

Ministère de l'Équipement
du Logement
et des Transports

Réalisation des remblais et des couches de forme



Guide technique

Fascicule I

Principes généraux





Sommaire

FASCICULE I : PRINCIPES GENERAUX

Sommaire

FASCICULE II - ANNEXES TECHNIQUES

Abréviations Symboles

ABREVIATIONS

PST : Partie supérieure des terrassements : elle est constituée par le(s) matériau(x) situé(s) à environ 1 m en dessous de la couche de forme (ou en dessous de la couche de fondation en l'absence de couche de forme).

PST : n° i Cas n° i (i de 0 à 7) de PST (défini par la nature du ou des matériaux la constituant et leur environnement hydrique).

AR : Arase terrassement : c'est la plate-forme de la PST

ARi : Classe i (i de 0 à 4) de portance de l'AR

PF : Plate-forme support de chaussée : c'est la plate-forme sur laquelle est mise en œuvre la première assise de la chaussée, autrement dit c'est la plate-forme de la couche de forme ou l'AR en l'absence de couche de forme.

PFi : classe i (i de 1 à 4) de portance de la PF

th : Etat hydrique très humide

h : Etat hydrique humide

m : Etat hydrique moyen

s : Etat hydrique sec

ts : Etat hydrique très sec

Pi : Compacteur à pneus de classe i (i de 1 à 3)

Vi : Compacteur vibrant de classe i (i de 1 à 5)

VPi : Compacteur vibrant à pieds dameurs de classe i (i de 1 à 5)

SPi : Compacteur statique à pieds dameurs de classe i (avec i = 1 ou 2)

PQi : Plaque vibrante de classe i (avec i = 3 ou 4)

LH : Liant hydraulique

Abréviations Symboles

SYMBOLES DES PARAMETRES DE CLASSIFICATION DES MATERIAUX

Symbole	Désignation	Unité
w	Teneur en eau	%
w_n	Teneur en eau naturelle	%
w_{OPN}	Teneur en eau optimum Proctor normal	%
w_L	Limite de liquidité	%
w_P	Limite de plasticité	%
Ip	Indice de plasticité	%
Ic	Indice de consistance	
ES	Equivalent de sable	%
Dmax	Diamètre du plus gros élément	mm
VBS	Valeur au bleu de méthylène du sol (mesurée sur la fraction 0/50 mm)	g de bleu/ 100 g de sol
ρd	Masse volumique apparente d'un échantillon de roche déshydraté	g/cm^3
IPI	Indice portant immédiat	%
LA	Coefficient Los Angelès	%
MDE	Coefficient micro-Deval en présence d'eau	%
FS	Coefficient de friabilité des sables	%
FR	Coefficient de fragmentabilité	%
DG	Coefficient de dégradabilité	%
MO	Teneur en matières organiques	%

Abréviations Symboles

SYMBOLES DES PARAMETRES DE COMPACTAGE

Symbole	Désignation	Unité
CR	Charge par roue	t
M1	Masse totale s'appliquant sur la génératrice d'un cylindre (vibrant ou statique)	kg
L	Longueur de la génératrice d'un cylindre (vibrant ou statique)	cm
M0	Masse de la partie vibrante sollicitée par l'arbre à balourd	kg
me	Moment des excentriques de l'arbre à balourd	m.kg
A0	Amplitude théorique à vide d'un rouleau vibrant A0 = 1000x(me/M0)	mm
e	Epaisseur maxi de la couche pouvant être compactée avec un engin donné sur un sol donné	m
Q/S	Ratio entre le volume de matériau compacté pendant un temps donné et la surface balayée par le compacteur sur ce volume pendant le même temps. Ce ratio exprime aussi l'épaisseur théorique compactée en une application de la charge du compacteur	m
N	Nombre d'applications de charge en une passe du compacteur	
n	Nombre de passes	
V	Vitesse de déplacement du compacteur	km/h
Q/L	Débit horaire par m de largeur de compactage d'un compacteur	m^3/hxm

Présentation

Les enseignements recueillis depuis maintenant plus de quinze années d'application de la "Recommandation pour les Terrassements Routiers" (RTR) ont été jugés suffisants pour que le SETRA et le LCPC décident que le moment était venu d'effectuer une révision de fond de cet important document qui, à sa parution en 1976, avait été salué comme le premier outil méthodologique permettant de traiter de manière rationnelle les principaux aspects techniques liés à l'étude des projets, la rédaction des marchés et la conduite des travaux de construction des remblais et des couches de forme.

La démarche générale suivie dans le nouveau document s'inspire pour l'essentiel de celle du document originel qui, on le rappelle, comprenait quatre volets :

- l'établissement d'une classification spécifique des sols, définissant différentes classes, dont chacune rassemble des sols présentant un comportement suffisamment similaire pour qu'il soit justifié de leur appliquer les mêmes modalités de mise en œuvre en remblai d'une part ou en couche de forme d'autre part,
- l'énoncé des modalités de mise en œuvre propres à chaque classe de sols, suivant l'utilisation concernée : remblai ou couche de forme,
- la traduction en termes quantitatifs, directement utilisables en tant que spécifications, des modalités pratiques d'exécution du compactage applicables aux remblais et aux couches de forme,
- les procédures et les techniques de contrôle propres à la réalisation des remblais et des couches de forme (1).

Avant de présenter les grandes lignes du document, il convient de rappeler deux aspects essentiels qui précisent ses limites d'application.

- Le premier est que les conditions d'utilisation en remblai et en couche de forme proposées doivent essentiellement être considérées comme des règles de référence à partir desquelles l'ingénieur doit apprécier en fonction de son expérience les adaptations qu'il peut être en mesure d'accepter pour tenir compte de l'ensemble des particularités de son chantier. En effet seuls les paramètres techniques les plus importants (caractéristiques géotechniques des matériaux, situation météorologique, techniques d'exécution courantes ...) ont été considérés. Or il est certain que le déroulement d'un chantier de terrassement est nécessairement dépendant de contraintes d'autres natures (administratives, financières, environnement, programmation...) dont la prise en compte n'entre pas dans le cadre d'un guide technique.
- Le second aspect important du document est qu'il n'apporte de réponses que sur les questions relatives aux modalités d'utilisation des matériaux en remblai et en couche de forme. De ce fait, il ne doit pas être assimilé à un guide complet de conception et de réalisation de ces natures d'ouvrages. En effet, pour prétendre à ce titre, de nombreux autres points devraient être précisés, comme par exemple : les pentes de talus, la localisation respective des différentes natures de matériaux dans les ouvrages, les principes régissant l'implantation, le dimensionnement et le contrôle de fonctionnement des ouvrages de drainage interne, les dispositions

(1) Les procédures et techniques de contrôle ne sont pas traitées dans le présent document. Elles feront l'objet d'un prochain guide en cours d'élaboration.

particulières assurant la stabilité des talus en matériaux évolutifs ou sensibles à l'eau, les précautions de construction à adopter sur les sols compressibles, etc.

MODIFICATIONS PAR RAPPORT A LA RTR, VERSION 1976

Par rapport à la RTR version 1976, les améliorations, compléments, modifications..., introduits dans le présent document, portent principalement sur les points suivants.

La classification

Une distinction nette a été établie entre les sols et les matériaux rocheux, pour pouvoir traiter séparément ces deux natures différentes de matériaux. Les principes de la classification 1976 ont été conservés pour les sols, mais une classification inédite est proposée pour les matériaux rocheux.

Des paramètres d'identification nouveaux, plus significatifs des problèmes posés par l'emploi des matériaux dans la construction des remblais et des couches de forme ont été introduits : valeur au bleu de méthylène des sols (VBS) pour apprécier la sensibilité à l'eau ; coefficients Los Angeles (LA), micro-Deval en présence d'eau (MDE), friabilité des sables (FS) pour apprécier la tenue sous trafic ; coefficients de fragmentabilité (FR) et dégradabilité (DG) pour apprécier le caractère évolutif, etc.

Deux états hydriques extrêmes (état très humide - th - et état très sec - ts -), ont été ajoutés aux trois états (humide - h -, moyen - m - et sec - s -) considérés dans le document initial ; ces états extrêmes sont en principe des états ne permettant plus l'emploi des matériaux dans les conditions techniques et/ou économiques françaises habituelles.

A signaler également que des modifications ont été apportées aux principes de classification des sols grossiers, comportant une fraction fine (classe C) et aux valeurs de certains seuils délimitant les classes (indice de plasticité Ip pour les sols A, teneur en eau w pour les craies, etc.).

Les conditions d'utilisation en remblai

Sur ce chapitre, le principal apport du document est la présentation des conditions d'utilisation des matériaux qui n'avaient pas été proposées en 1976, faute d'expérience, et qui étaient mentionnées comme étant "à l'étude" (cas des roches évolutives).

En outre quelques modifications ont également été apportées. Elles concernent l'abandon :

- de la technique d'extraction "avec lavage dans la nappe" préconisée pour éliminer une partie des fines contenues dans un matériau graveleux, mais jugée aujourd'hui insuffisamment fiable et peu acceptable dans le contexte de protection de l'environnement ;

- de la technique des "couches sandwich". En effet cette technique ne constitue pas à proprement dit une modalité de réemploi des sols fins trop humides puisqu'elle ne propose pas de modification à leur apporter. En revanche cette pratique est envisageable au niveau de la conception et de la réalisation des remblais dans la mesure où l'on a bien évalué les conditions techniques, hydrauliques et organisationnelles qu'elle implique (choix des matériaux à réunir et quantités nécessaires au moment voulu) ;
- l'introduction d'une nouvelle rubrique G "Action sur la granularité" recensant les différentes actions pouvant être exigées pour modifier la granularité de certains matériaux.

Les conditions d'utilisation en couche de forme

Ce chapitre a été revu en profondeur dans le double souci d'une part, d'intégrer les acquis de ces dernières années en matière de matériaux et de techniques d'exécution des couches de forme et d'autre part, de proposer un cadre méthodologique pour traiter la question délicate de la prise en compte de la couche de forme dans le dimensionnement de la chaussée.

Sur le premier point, le présent document a largement pris en compte les possibilités d'amélioration des sols, des matériaux rocheux, voire de certains sous-produits industriels pour les rendre aptes à constituer des matériaux de couche de forme, à partir de techniques actuellement éprouvées telles que le traitement avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques, les actions modifiant la granularité (scalpage, lavage, criblage, fragmentation, etc.), l'application de protections superficielles adaptées (enduits gravillonnés, cloutés, couche de fin réglage, etc.).

Pour ce qui concerne le second point, la méthodologie proposée apporte des éléments nécessaires pour évaluer le rôle structurel qu'il est possible de faire jouer à la couche de forme dans le fonctionnement de la chaussée, à savoir :

- la portance à long terme à affecter suivant les cas à la partie supérieure des terrassements (PST), sur laquelle est mise en œuvre la couche de forme,
- le dimensionnement conseillé de la couche de forme (pour être en mesure d'exécuter correctement le chantier et intégrer la couche de forme dans le dimensionnement de la chaussée), en fonction des caractéristiques mécaniques constatées ou prévues de la partie supérieure des terrassements et de celles du matériau de couche de forme utilisé.

Les modalités de compactage et de régalage des matériaux

Ce chapitre a également fait l'objet d'une révision assez fondamentale, bien que les deux paramètres e (épaisseur maximum des couches) et Q/S (paramètre lié à l'efficacité de l'engin de compactage utilisé), déjà proposés dans le document originel pour exprimer quantitativement les conditions de compactage, aient été conservés.

Les changements portent sur les aspects suivants :

- un nouveau système de classification des compacteurs vibrants, ayant pris en compte les progrès des connaissances sur le compactage est présenté. Il s'appuie sur les deux paramètres reconnus comme étant les plus représentatifs de l'efficacité de ces engins : M1/L, masse par unité de longueur de génératrice du/ou des cylindres vibrants (paramètre déjà considéré dans la première classification) et A0 amplitude à vide, qui s'exprime par le rapport entre le moment des balourds m.e et la masse vibrante M0,
- la possibilité, dans le cas des rouleaux vibrants, de varier la vitesse de déplacement des engins (dans une gamme relativement limitée tout de même) pour optimiser leur débit dans un cas de chantier donné,
- les niveaux d'énergie de compactage exigés. Ceux-ci ont été augmentés dans le cas des matériaux sensibles à l'eau se trouvant dans un état sec, des matériaux traités aux liants hydrauliques utilisés en couche de forme et pour certains autres matériaux (matériaux rocheux évolutifs notamment),
- les niveaux de qualité du compactage visés pour les remblais et les couches de forme. Ces niveaux ont été quantifiés et la nouvelle présentation des tableaux donne pour chaque cas de compactage les valeurs e et Q/S à respecter, l'indication du nombre de passes moyen et celle du débit théorique Q/Lc par unité de largeur du compacteur utilisé. Enfin, un certain nombre d'engins de compactage non visés dans le document de 1976, comme les rouleaux vibrants à pieds dameurs et les grosses plaques vibrantes, ont été pris en compte.

ORGANISATION DU DOCUMENT "REALISATION DES REMBLAIS ET DES COUCHES DE FORME"

Le présent document est organisé en deux fascicules : un texte de présentation et un recueil d'annexes.

Le fascicule I intitulé "Principes généraux" présente, commente et justifie si besoin les principes sur lesquels repose l'ensemble du document. Il n'a pas à proprement parler d'utilité opérationnelle, mais sa connaissance est nécessaire à la compréhension de la démarche d'ensemble. Il s'articule autour des quatre chapitres : classification, conditions d'utilisation en remblai, conditions d'utilisation en couche de forme, modalités de compactage et de régalage.

Le fascicule II est constitué d'une série de quatre annexes. C'est la partie véritablement opérationnelle du document. On y trouve successivement :

- les tableaux de la classification des sols, des matériaux rocheux et des sous-produits industriels,
- les tableaux des conditions d'utilisation des matériaux en remblai (1),
- les tableaux des conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme, avec les valeurs définissant un dimensionnement minimum recommandé des

(1) Matériaux = sols + matériaux rocheux + sous-produits industriels.

couches de forme,
- les modalités de compactage des remblais et des couches de forme.

C'est précisément dans ces annexes que les responsables, chacun à leur niveau, trouveront les éléments techniques nécessaires à la définition des études de reconnaissance géotechnique, à l'établissement du projet, à la rédaction du marché, à l'exécution et au contrôle de la mise en œuvre.

Chapitre 1

Classification des matériaux utilisés pour la construction des remblais et des couches de forme

1.1 - Nécessité d'une classification spécifique

Les différents systèmes de classifications géotechniques des sols et des matériaux rocheux proposés jusqu'à présent ont été établis avec le souci de servir l'ingénieur dans l'ensemble des différents domaines du Génie Civil où ces matériaux sont concernés (ouvrages en terre, fondations, stabilité des pentes, assises de chaussée ou élaboration des granulats...). Cette recherche d'universalité s'est avérée trop ambitieuse car la complexité des comportements des sols fait que les propriétés qui sont significatives pour un certain usage ne sont souvent plus les mêmes dès que l'on s'intéresse à un autre usage. Ceci conduit alors à rechercher des classifications spécifiques à chaque grand domaine d'utilisation de ces matériaux.

Ainsi, pour la réalisation des remblais et des couches de forme, les différentes classifications en usage au niveau international se sont montrées mal adaptées soit parce qu'elles étaient établies sur la base de paramètres n'ayant pas, ou peu, de signification vis-à-vis des problèmes rencontrés (par exemple le coefficient d'uniformité dans le cas des matériaux granulaires), soit surtout parce qu'elles occultaient certains aspects capitaux (l'état hydrique des sols sensibles à l'eau, le caractère évolutif de certains matériaux rocheux, ou encore la dimension maximale des plus gros éléments présents dans le sol).

Un progrès notable a été apporté en 1976 par la première édition de la Recommandation pour les Terrassements Routiers (RTR 1976) qui proposait une classification des sols établie précisément en fonction des problèmes posés par leur utilisation dans la construction des remblais et des couches de forme, et s'appuyant sur les paramètres d'identification et de comportement jugés les plus représentatifs à cet égard.

La classification des sols et matériaux rocheux présentée ci-après conserve l'esprit de la classification 1976 et apporte certaines améliorations déjà évoquées dans le préambule. Elle fait l'objet de la norme AFNOR (NF P 11-300).

Tout sol ou matériau rocheux peut donc être rangé selon ce système de classification dès lors que les valeurs des paramètres sur lesquels il s'appuie sont connues et que les essais permettant de les déterminer sont reconnus significatifs sur le sol ou le matériau rocheux considéré.

Cette classification reste cependant axée sur les conditions de réutilisation et, en particulier, ne rend pas compte des problèmes liés aux difficultés d'extraction.

1.2 - Classification des sols (classes A, B, C et D)

Les "sols" sont des matériaux naturels, constitués de grains pouvant se séparer aisément par simple trituration ou éventuellement sous l'action d'un courant d'eau. Ces grains peuvent être de dimensions très variables : des argiles aux blocs. Les sols sont de nature et d'origine géologique diverses : alluvions, matériaux meubles sédimentaires, dépôts glaciaires, sols résiduels (1)...

(1) Les sols résiduels sont formés sur place par un processus d'altération physico-chimique des roches (exemple : arènes granitiques, latérites...).

Les sols ayant une teneur en matières organiques supérieure à 3 %, sont classés à part en classe F avec les sous-produits industriels.

1.2.1 - Paramètres retenus pour la classification des sols

Les paramètres retenus se rangent en trois catégories :

- paramètres de nature;
- paramètres de comportement mécanique,
- paramètre d'état.

Ils sont toujours déterminés sur la fraction 0/50 mm qui est la fraction susceptible d'être identifiée par les essais de laboratoire usuels.

Paramètres de nature

Ils se rapportent à des caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire qui ne varient pas ou peu, ni dans le temps ni au cours des différentes manipulations que subit le sol au cours de sa mise en œuvre.

Les paramètres retenus concernent la granularité et l'argilosité.

La granularité (normes P 94-056 et 057)

Le Dmax : c'est la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol. Ce paramètre est déterminant pour préjuger des ateliers de terrassements utilisables et notamment pour évaluer l'épaisseur des couches élémentaires et les conditions de malaxage éventuel avec un liant. C'est également un paramètre important à connaître pour apprécier la représentativité des essais de laboratoire. Toutefois la détermination de ce paramètre peut tolérer une certaine imprécision et en règle générale une estimation visuelle est suffisante.

Seuil retenu :

- **50 mm**. C'est la valeur proposée pour distinguer les sols fins, sableux et graveleux (classes A, B, D_1 et D_2), des sols blocailleux (classes C et D_3) ; c'est aussi une valeur limite couramment admise actuellement pour distinguer les sols pouvant être malaxés intimement avec un liant pour constituer des couches de forme de qualité ; enfin le comportement de la fraction 0/50 mm d'un sol peut être correctement appréhendé à partir des essais de laboratoire usuels.

Lorsque le matériau comporte des éléments fins et une fraction grossière 50/D non négligeable (classe C) on distingue deux sous-classes :

- la sous-classe C_1 qui rassemble les matériaux à éléments "anguleux" possédant une importante fraction 0/50 mm (> 60 à 80 % estimés visuellement en général) et l'ensemble des matériaux à éléments "roulés". Pour les sols de cette classe on considère que leur comportement est assimilable à celui de leur fraction 0/50 mm qu'il suffit alors d'identifier,

- la sous-classe C_2 qui comprend les matériaux à éléments anguleux possédant une faible fraction 0/50 mm (≤ 60 à 80 % estimée visuellement en général) pour lesquels il n'est plus admissible d'assimiler leur comportement à celui de leur fraction 0/50 mm.

Pour tenir compte des caractéristiques de la fraction 0/50, l'identification des sols de la classe C est précisée à l'aide d'un double symbole du type C_1 A_i, C_1 B_i, C_2 A_i ou C_2 B_i, A_i ou B_i étant la classe de la fraction 0/50 du matériau considéré. La valeur du Dmax peut être indiquée en exposant de la sous-classe. Exemple : $C_1^{150}B_4h$ est un sol de classe C_1 dont le Dmax est de 150 mm et la fraction 0/50 un sol de la classe B_4h.

Le tamisat à 80 µm : ce paramètre permet de distinguer les sols riches en fines et, dans une large mesure, d'évaluer leur sensibilité à l'eau (1).

Seuils retenus :

- **35 %** : c'est le seuil au-delà duquel le comportement du sol peut être considéré comme régi par celui de la fraction fine (≤ 80 µm),
- **12 %** : c'est un seuil conventionnel permettant d'établir une distinction entre les matériaux sableux et graveleux pauvres ou riches en fines.

Le tamisat à 2 mm : ce paramètre permet d'établir une distinction entre les sols à tendance sableuse et les sols à tendance graveleuse.

Seuil retenu :

- **70 %** : au-delà de 70 % on définit les sols à tendance sableuse et en-deçà les sols à tendance graveleuse.

L'argilosité

L'indice de plasticité Ip (norme P 94-051) : c'est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité des sols. Son interprétation est d'autant plus fiable que la proportion pondérale de la fraction 0/400 µm (fraction servant à l'essai) contenue dans le sol étudié est importante et que l'argilosité de cette fraction est grande.

Au-delà d'une proportion de 50 % de cette fraction et d'une valeur de 12, l'interprétation de l'Ip est simple mais elle devient quasiment impossible lorsque cette proportion tombe en dessous de 35 % et la valeur de l'Ip en dessous de 7.

(1) La notion de sensibilité à l'eau est prise ici dans un sens assez restrictif car il est à peu près certain qu'un sol totalement insensible à l'eau n'existe pas. Cette notion doit être comprise comme définissant seulement la plus ou moins grande variation de la portance d'un sol sous l'effet d'une variation donnée de sa teneur en eau (du fait notamment de son exposition aux agents météorologiques). Aussi un sol est dit d'autant plus sensible à l'eau que sa chute de portance est élevée pour une faible augmentation de sa teneur en eau et inversement. Toutefois cette notion ne couvre ni la perte de traficabilité du sol du fait d'une augmentation de sa glissance lors d'une pluie même faible, ni les aspects liés à sa mise en œuvre dans l'eau, ni son comportement vis-à-vis de l'érosion pluviale ou interne, du gel, etc.

Seuils retenus :

- **12** : limite supérieure des sols faiblement argileux,
- **25** : limite supérieure des sols moyennement argileux,
- **40** : limite entre les sols argileux et très argileux.

La valeur de bleu de méthylène VBS : il s'agit d'un autre paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol mais dont l'application à l'identification des sols remonte seulement à quelques années. Ce paramètre représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules du sol, ou autrement dit une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

La valeur de bleu d'un sol (VBS) est déterminée par l'essai au bleu de méthylène "à la tache".



Ensemble du matériel d'essai.



Auréole bleue appaissant à la périphérie de la tache indiquant la fin de l'adsorbtion du bleu sur le sol.

Etant donné que dans un sol c'est avant tout la surface des particules contenues dans sa fraction argileuse (≤ 2 µm) qui détermine sa surface spécifique, on peut considérer que la valeur de bleu de méthylène VBS (valeur de bleu du sol) exprime globalement la quantité et la qualité (ou activité) de l'argile contenue dans ce sol.
En pratique, on détermine la VBS à partir de l'essai au bleu de méthylène à la tache sur la fraction 0/2 mm. La valeur trouvée est alors rapportée à la fraction 0/50 par une règle de proportionnalité. C'est cette dernière valeur qui est appelée valeur au bleu de méthylène du sol (cf. norme P 94-068).

La VBS s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de sol.

Seuils retenus :

- **0,1** : seuil en dessous duquel on peut considérer que le sol est insensible à l'eau (au sens défini précédemment). Ce critère doit cependant être complété par la vérification du tamisat à 80 µm qui doit être ≤ 12 %.
- **0,2** : seuil au-dessus duquel apparaît à coup sûr la sensibilité à l'eau.
- **1,5** : seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux.
- **2,5** : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne.
- **6** : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.
- **8** : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

Remarques :

- *Choix entre Ip et VBS*

L'Ip et la VBS d'un sol étant tous deux des paramètres mesurant l'argilosité, il est utile de préciser les domaines respectifs d'application de chacun d'eux dans l'identification des sols.

Tout d'abord comme la VBS d'un sol est une grandeur qui exprime globalement et selon une échelle quasi linéaire la quantité et l'activité de l'argile contenue dans le sol étudié, elle est applicable à l'identification de tous les sols. C'est pourquoi dans la présente classification toutes les classes de sols sont distinguées en tout ou partie à partir de ce paramètre.

Toutefois, l'Ip présente dans le cas des sols moyennement à très argileux quelques avantages sur la VBS. D'abord c'est un paramètre pour lequel on dispose d'une longue expérience dans l'interprétation, ensuite il est plus sensible que la VBS dès que les sols deviennent vraiment argileux, enfin et surtout il s'agit d'un paramètre qui est à la fois un paramètre d'identification, mais aussi de comportement. En effet, l'Ip définit en réalité l'intervalle de teneur en eau dans lequel le sol reste souple et déformable tout en conservant une certaine résistance au cisaillement. La connaissance de cet intervalle est d'une manière générale très utile dans la conception des ouvrages en terre.

Dans la présente classification ces éléments ont été pris en compte en réservant la possibilité d'identifier un sol à partir de l'un ou l'autre de ces deux paramètres dans le cas des sols moyennement à très argileux. Lorsque cette possibilité est prévue, le critère d'argilosité figurant en caractère gras dans les tableaux de l'annexe 1 est celui qu'il convient de choisir en priorité.



Le CLASSOL : cet appareil réalise l'identification de la nature des sols de manière rapide et semi-mécanisée.

- ***Référence au paramètre équivalent de sable (ES).***

Le paramètre équivalent de sable retenu dans la classification RTR de 1976 pour distinguer les sols peu à très peu argileux perd beaucoup de son intérêt depuis l'introduction de la VBS. Néanmoins les valeurs indiquées en 1976 figurent encore dans les tableaux de l'annexe 1 pour permettre aux géotechniciens encore peu familiarisés

avec les VBS d'entrer dans la nouvelle classification et de pouvoir ainsi utiliser l'ensemble du document.

Paramètres de comportement mécanique

Ces paramètres ne sont pris en considération que pour juger de l'utilisation possible des sols en couche de forme. Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic et qui de ce fait peuvent être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme, de ceux qui risquent de se fragmenter pour se transformer en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisable dans son état naturel sans dispositions particulières (traitement...).

Les paramètres de comportement considérés dans la classification sont : ***les coefficients Los Angeles (LA)*** (norme P 18-573) et ***micro-Deval en présence d'eau (MDE)*** (norme P 18-572), mesurés sur la fraction granulaire 10/14 (ou à défaut sur la fraction 6,3/10) et ***le coefficient de friabilité des sables (FS)*** mesuré sur la fraction 0/1 ou 0/2 mm (norme P 18-576).

Seuils retenus :

- **45** pour les valeurs LA et MDE
- **60** pour les valeurs FS.

Paramètres d'état

Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol mais fonction de l'environnement dans lequel il se trouve.

Pour les sols meubles sensibles à l'eau, le seul paramètre d'état considéré dans la présente classification est l'état hydrique : son importance est capitale vis-à-vis de tous les problèmes de remblai et de couche de forme.



Extraction des sols de classes A_2m et A_3m par conditions météorologiques "évaporantes" : des conditions de chantier idéales! ...

Différents états hydriques considérés :

Cinq états hydriques sont distingués dans la présente classification :

- *L'état très humide (th) :*
  c'est un état d'humidité très élevé ne permettant plus en général la réutilisation du sol dans les conditions technico-économiques françaises actuelles.

- *L'état humide (h) :*
  c'est un état d'humidité élevé autorisant toutefois la réutilisation du sol en prenant des dispositions particulières (aération, traitement, remblais de faible hauteur...) estimées comme normales dans les conditions technico-économiques françaises actuelles.
- *L'état d'humidité moyenne (m) :*
  c'est l'état d'humidité optimum (minimum de contraintes pour la mise en œuvre).
- *L'état sec (s) :*
  c'est un état d'humidité faible mais autorisant encore une mise en œuvre en prenant des dispositions particulières (arrosage, surcompactage...) estimées comme normales dans les conditions technico - économiques françaises actuelles.
- *L'état très sec (ts) :*
  c'est un état d'humidité très faible n'autorisant plus en général la réutilisation du sol dans les conditions technico-économiques françaises actuelles.



La portance des sables fins des classes B_1 ou D_1 est quasi-indépendante de leur teneur en eau mais ces sols sont en revanche très sensibles à l'érosion pluviale.

Paramètres utilisés pour caractériser l'état hydrique :

La présente classification a retenu pour caractériser l'état hydrique d'un sol, l'un ou l'autre des trois paramètres suivants :

- la position de la teneur en eau naturelle (w_n) de la fraction 0/20 du matériau par rapport à l' optimum Proctor normal (w_{OPN}) exprimée par le rapport : $\frac{w_n}{w_{OPN}}$. Ce rapport est le paramètre d'état le plus fiable pour caractériser les états (s) et (ts) car les difficultés d'obtention de la compacité requise en dépendent directement. Sa signification est en revanche moins claire pour distinguer les états (h) et (th), (norme P 94-093),

- la position de la teneur en eau naturelle (w_n) par rapport aux limites d'Atterberg (w_L et wp) qui s'exprime par *l'Indice de consistance (Ic)*, (norme P 94-051).

  $Ic = \frac{w_L - w_n}{I_p}$. L'Ic permet de caractériser correctement les cinq états (th), (h), (m), (s) et (ts) mais seulement dans le cas des sols fins moyennement et très argileux comportant au moins 80 % à 90 % d'éléments ≤ 400 mm,

- *l'indice portant immédiat (IPI)* qui exprime la valeur de l'Indice CBR immédiat mesuré sans surcharge, ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor normal et à sa teneur en eau naturelle (norme P 94-078).

L'IPI est en général le paramètre à privilégier pour caractériser les états (h) et (th) car il traduit concrètement les difficultés de circulation des engins. En revanche, il perd sa signification dans les états (s) et (ts).

Sol de la classe B_4h à B_4th (moins de 8% de fines ; VBS environ 1g)



Extraction après rabattement de la nappe



Comportement à la mise en remblai

Seuils retenus :
Ils sont indiqués dans les tableaux de la classification des sols figurant dans l'annexe 1.

Il convient de noter qu'il peut ne pas y avoir correspondance parfaite entre les valeurs de ces paramètres (par exemple, un sol A_1h ayant une teneur en eau comprise entre 1,1 et 1,25 w_{OPN}, peut ne pas présenter un IPI strictement compris entre 3 et 8).



Stock de grave alluvionnaire propre de classe D_2 insensible à l'eau

1.2.2 - Exemple de tableau de classification des sols

On trouvera en annexe 1, la classification détaillée des sols (classes A, B, C et D). A titre d'exemple, un extrait de cette annexe est reproduit ci-après (Tableau I) pour les sols de la classe A.

Classe A

SOLS FINS

Classement selon la nature					Classement selon l'état hydrique	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe
$D_{max} \leq 50$ mm et tamisat à 80 µm > 35 %	**A** sols fins	**VBS** ≤ 2,5 ou $I_p \leq 12$	A_1 Limons peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	Ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque leur w_n est proche de w_{OPN}. Le temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est relativement court, mais la perméabilité pouvant varier dans de larges limites selon la granulométrie, la plasticité et la compacité, le temps de réaction peut tout de même varier assez largement. Dans le cas de ces sols fins peu plastiques, il est souvent préférable de les identifier par la valeur de bleu de méthylène VBS, compte tenu de l'imprécision attachée à la mesure de l'Ip.	**IPI** ≤ 3 ou $w_n \geq 1{,}25\ w_{OPN}$	A_1th
					3 < **IPI** ≤ 8 ou $1{,}10\ w_{OPN} \leq w_n < 1{,}25\ w_{OPN}$	A_1h
					8 < IPI ≤ 25 ou $0{,}9\ w_{OPN} \leq w_n < 1{,}10\ w_{OPN}$	A_1m
					$0{,}7\ w_{OPN} \leq w_n < 0{,}9\ w_{OPN}$	A_1s
					$w_n < 0{,}7\ w_{OPN}$	A_1ts
		$12 < I_p \leq 25$ ou 2,5 < VBS ≤ 6	A_2 Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...	Le caractère moyen des sols de cette sous-classe fait qu'ils se prêtent à l'emploi de la plus large gamme d'outils de terrassement (si la teneur en eau n'est pas trop élevée). Dès que l'Ip atteint des valeurs ≥ 12, il constitue le critère d'identification le mieux adapté.	**IPI** ≤ 2 ou **Ic** ≤ 0,9 ou $w_n \geq 1{,}3\ w_{OPN}$	A_2th
					2 < **IPI** ≤ 5 ou 0,9 < **Ic** ≤ 1,05 ou $1{,}1\ w_{OPN} \leq w_n < 1{,}3\ w_{OPN}$	A_2h
					5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < Ic ≤ 1,2 ou $0{,}9\ w_{OPN} \leq w_n < 1{,}1\ w_{OPN}$	A_2m
					1,2 < Ic ≤ 1,4 ou $0{,}7\ w_{OPN} \leq w_n < 0{,}9\ w_{OPN}$	A_2s
					Ic > 1,4 ou $w_n < 0{,}7\ w_{OPN}$	A_2ts
		$25 < I_p \leq 40$ ou 6 < VBS ≤ 8	A_3 Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible, et collants ou glissants à l'état humide, d'où difficulté de mise en œuvre sur chantier (et de manipulation en laboratoire). Leur perméabilité très réduite rend leurs variations de teneur en eau très lentes, en place. Une augmentation de teneur en eau assez importante est nécessaire pour changer notablement leur consistance.	**IPI** ≤ 1 ou **Ic** ≤ 0,8 ou $w_n \geq 1{,}4\ w_{OPN}$	A_3th
					1 < **IPI** ≤ 3 ou 0,8 < **Ic** ≤ 1 ou $1{,}2\ w_{OPN} \leq w_n < 1{,}4\ w_{OPN}$	A_3h
					3 < IPI ≤ 10 ou 1 < Ic ≤ 1,15 ou $0{,}9\ w_{OPN} \leq w_n < 1{,}2\ w_{OPN}$	A_3m
					1,15 < Ic ≤ 1,3 ou $0{,}7\ w_{OPN} \leq w_n < 0{,}9\ w_{OPN}$	A_3s
					Ic > 1,3 ou $w_n < 0{,}7\ w_{OPN}$	A_3ts
		$I_p > 40$ ou VBS > 8	A_4 Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Ces sols sont très cohérents et presque imperméables : s'ils changent de teneur en eau, c'est extrêmement lentement et avec d'importants retraits ou gonflements. Leur emploi en remblai ou en couche de forme n'est normalement pas envisagé mais il peut éventuellement être décidé à l'appui d'une étude spécifique s'appuyant notamment sur des essais en vraie grandeur.	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique.	A_4th
						A_4h
						A_4m
						A_4s

*Les paramètres inscrits en **caractères gras** sont ceux dont le choix est à privilégier.*

Tableau I - Classification des sols A

1.3 - Classification des matériaux rocheux (classe R)

Bien qu'après son extraction, un déblai rocheux soit transformé en un matériau susceptible d'être considéré, au moins partiellement, comme un sol meuble au sens défini au § 1.2 précédent, il faut au préalable être en mesure de prévoir, à partir de la roche en place, le comportement du matériau après abattage. Ce besoin a conduit à établir un classement des matériaux rocheux sur la base de leur nature géologique, de résultats d'essais (fragmentabilité, dégradabilité, masse volumique... pratiqués sur des prélèvements représentatifs) et de l'expérience que l'on possède de leur comportement au cours des différentes phases du terrassement.



Pour caractériser un déblai rocheux, il faut au préalable être en mesure de prévoir à partir de la roche en place le comportement du matériau après abattage.

Pour caractériser un massif rocheux en vue de son emploi en remblai ou en couche de forme, le géotechnicien est donc conduit à procéder en deux temps :

- la première étape consiste à identifier, au moins sommairement, la nature pétrographique de la roche en s'appuyant principalement sur la documentation et le raisonnement géologique. Cette identification apporte déjà des informations importantes d'ordre qualitatif sur les caractères généraux de la roche et son comportement prévisible ; toutefois, cette première identification est en général insuffisante pour renseigner le projeteur sur les possibilités réelles d'utilisation du matériau,
- la seconde étape vise à préciser comment le matériau va se comporter tout au long des phases successives : extraction, chargement, régalage, compactage sous la circulation des engins lourds et sous la pluie, et s'il risque encore d'évoluer, une fois l'ouvrage en service, sous l'action des contraintes mécaniques, de l'eau ou du gel. Il s'agit là d'une opération complexe qui exige que le géotechnicien dispose d'une description précise du massif et qu'il ait une bonne connaissance des différentes techniques d'extraction et de mise en œuvre afin de pouvoir évaluer leurs effets sur le comportement du matériau.

Ce n'est qu'au terme de cette seconde étape qu'il peut communiquer au projeteur les données utiles à l'évaluation des possibilités d'emploi des matériaux issus d'un déblai rocheux : granularité obtenue, comportement sous trafic, caractère évolutif. Il faut toutefois admettre qu'une part d'incertitude existera toujours du fait que ces données résultent d'hypothèses dont la fiabilité dépend de nombreux facteurs (compétence et

expérience du géotechnicien, complexité géologique du site, moyens et délais d'étude disponibles...).

La classification des matériaux rocheux présentée ci-après reprend cette démarche en se référant toutefois essentiellement à l'expérience des matériaux rocheux terrassés en France au cours des vingt dernières années.

1.3.1 - Classification des matériaux rocheux d'après la nature pétrographique de la roche

Deux classes principales de matériaux rocheux sont distinguées à partir des grandes familles de roches habituellement considérées : les matériaux rocheux issus des roches sédimentaires d'une part et ceux issus des roches magmatiques et métamorphiques d'autre part.

Terrassement dans la craie :



Craie de la classe $R_{12}m$ (craie de densité moyenne à teneur en eau moyenne).



Craie de la classe $R_{13}h$ (craie de densité faible à teneur en eau élevée).

Deux matériaux de même nature géologique qui présentent des comportements en terrassement très différents.

Dans le cas des roches sédimentaires, la classification est subdivisée suivant les principales natures de roches rencontrées dans cette catégorie : craies, calcaires, roches argileuses, roches siliceuses, roches salines. Cette subdivision s'avère indispensable, car les matériaux issus de chacune des roches précitées présentent des comportements différents dans leur utilisation en remblai et en couche de forme.

Dans le cas des matériaux provenant de roches magmatiques et métamorphiques, aucune subdivision complémentaire n'a été introduite, ces matériaux pouvant être considérés comme ayant des comportements voisins du point de vue de leur utilisation en remblai et en couche de forme.

1.3.2 - Classification des matériaux rocheux d'après leur état et leurs caractéristiques mécaniques

Comme cela a été indiqué, la connaissance de la seule nature pétrographique de la roche dont est issu un matériau rocheux n'est généralement pas suffisante pour prévoir tous les problèmes que peut poser son utilisation en remblai ou en couche de forme.

Outre la question du choix de la méthode d'extraction qui n'est pas traitée ici, les aspects à considérer sont :

- l'aptitude du matériau à se fragmenter sous les sollicitations appliquées au cours des différentes phases de la mise en œuvre et en particulier la possibilité de produire une proportion d'éléments fins suffisante pour avoir un comportement de sol sensible à l'eau,
- la potentialité d'une évolution postérieurement à la mise en œuvre sous l'action des contraintes mécaniques seules ou conjuguées avec celles de l'eau et du gel,
- la teneur en eau dans le cas de matériaux très fragmentables tels que certaines craies, marnes, schistes sédimentaires, etc., qui peuvent renfermer dans leur structure une importante quantité d'eau qui se communiquera inévitablement aux éléments fins produits au cours du terrassement,
- la teneur en éléments solubles dans le cas de roches salines.

Roche argileuse peu fragmentable, très dégradable de la classe R_{34}



Un bloc immédiatement après extraction.



Le même bloc en cours de dégradation après plusieurs jours soumis aux intempéries.

Il est donc nécessaire de caractériser les matériaux rocheux vis-à-vis de ces aspects à partir de différents paramètres dont les suivants sont considérés comme les plus représentatifs.

Paramètres d'état et de comportement mécanique retenus dans la classification des matériaux rocheux

* *Le coefficient Los Angeles (LA)* (norme P 18-573).
* *Le coefficient micro-Deval en présence d'eau (MDE)* (norme P 18-572).

Ces deux paramètres sont introduits pour les roches relativement dures : granites, gneiss, calcaires et grès durs... Leur interprétation vise essentiellement les possibilités d'emploi de ces matériaux en couche de forme, voire en couche de chaussée (norme P 18-101).



Roche siliceuse (poudingue) de la classe R_{42}.

* *La valeur de la masse volumique de la roche déshydratée en place (ρd)* (norme P 94-064).

Ce paramètre qui présente l'avantage d'être aisément mesurable est en corrélation étroite avec la fragmentabilité des matériaux tels que les craies et les calcaires tendres. Son interprétation vise essentiellement les possibilités d'emploi de ces matériaux en remblai.

* *Le coefficient de fragmentabilité (FR)* (norme P 94-066) (cf. figure 1).

Ce coefficient est déterminé à partir d'un essai de fragmentation. Il s'exprime par le rapport des D_{10} d'un échantillon de granularité initiale donnée, mesurés avant et après lui avoir fait subir un pilonnage conventionnel avec la dame Proctor normal.

L'interprétation de ce paramètre vise les possibilités d'emploi en remblai des matériaux rocheux évolutifs et en couche de forme de certains matériaux rocheux plus ou moins friables pour lesquels les coefficients LA, MDE manquent de sensibilité.

* *Le coefficient de dégradabilité (DG)* (norme P 94-067) (cf. figure 2)

Ce coefficient s'exprime par le rapport des D_{10} d'un échantillon de granularité initiale donnée, mesurés avant et après l'avoir soumis à des cycles de séchage - immersion conventionnels. Son interprétation vise essentiellement les possibilités d'emploi en remblai des matériaux issus de roches argileuses (marnes, schistes sédimentaires...).

* *La teneur en eau naturelle (w_n)* (norme NF P 94-050)

L'influence de ce paramètre n'est prise en compte dans la classification que pour certaines craies et roches argileuses très fragmentables.

* *La teneur en éléments solubles (% NaCl, gypse...)*

L'interprétation de ce paramètre est évidemment limitée au cas des roches salines.



Roche magmatique dure (basalte) de classe R_{61}

Valeurs seuils retenues pour les paramètres d'état et de comportement des matériaux rocheux :

Elles figurent de manière détaillée dans l'annexe 1.

Figure 1 : Principe de l'essai de Fragmentabilité (FR)

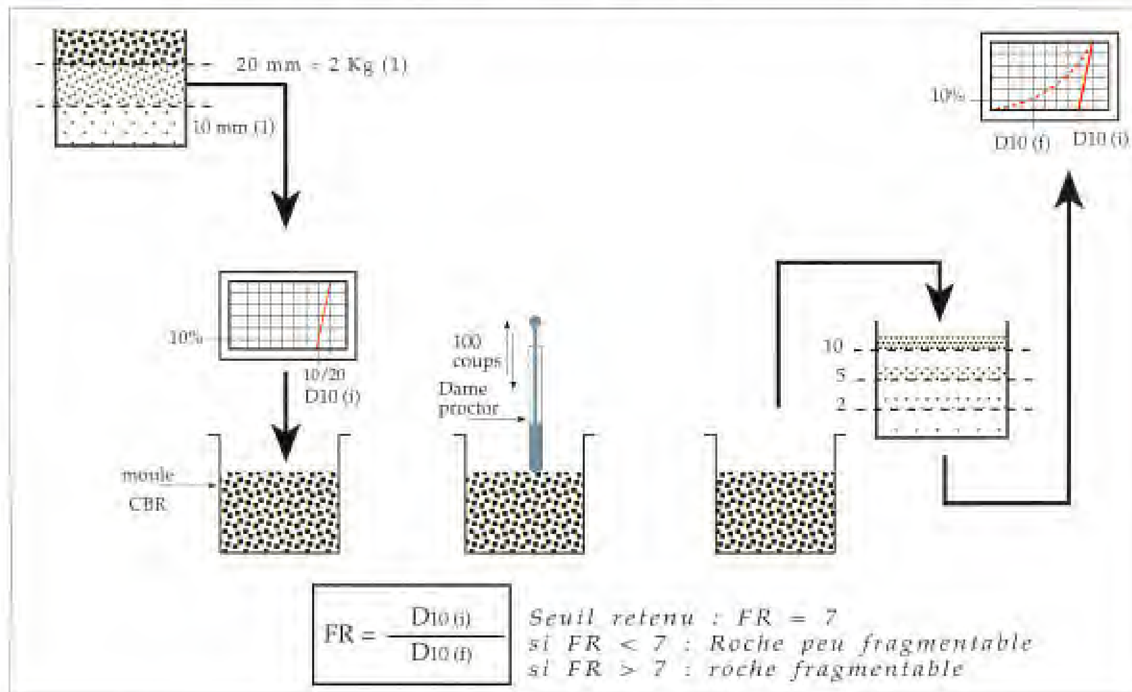
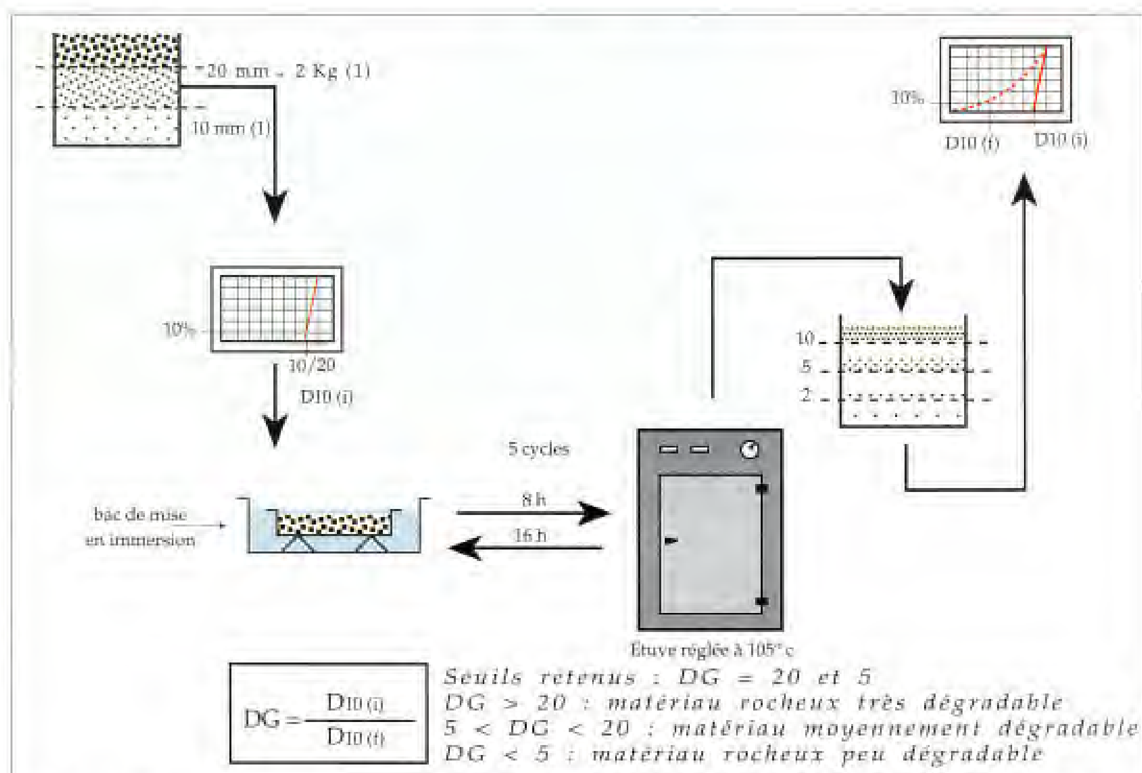


Figure 2 : Principe de l'essai de Dégradabilité (DG)



(1) Dans le cas des schistes sédimentaires la fraction soumise à l'essai est 40 / 80 mm.

1.3.3 - Exemple de tableau de classification des matériaux rocheux

On trouvera en annexe 1, la classification détaillée des matériaux rocheux (classe R). A titre d'exemple, un extrait de cette annexe est reproduit ci-après (tableau II) pour les matériaux R_1 (craies).

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique et le comportement		
Nature pétrographique de la roche			Caractères principaux	Paramètres et valeurs seuils retenus	sous - classe	
Roches sédimentaires	Roches carbonatées	R_1 craie	La craie est un empilement de particules de calcite dont les dimensions sont de l'ordre de 1 à 10μm. Cet empilement constitue une structure d'autant plus fragile que la porosité est grande (ou inversement que la densité sèche est faible). Les mesures et constatations de chantier ont montré qu'au cours des opérations de terrassement, il y a formation d'une quantité de fines en relation directe avec la fragilité de l'empilement. Lorsque la craie se trouve dans un état saturé ou proche de la saturation, l'eau contenue dans les pores se communique aux fines produites, leur conférant le comportement d'une pâte, qui s'étend rapidement à l'ensemble du matériau, empêchant la circulation des engins et générant des pressions interstitielles dans les ouvrages. Inversement, lorsque la teneur en eau est faible, la craie devient un matériau rigide, très portant mais difficile à compacter. Enfin certaines craies peu denses et très humides, peuvent continuer à se fragmenter, après mise en oeuvre, sous l'effet des contraintes mécaniques et du gel, principalement.	$\rho d > 1,7$	craie dense	R_{11}
				$1,5 < \rho d \leq 1,7$ et $w_n \geq 27$	craie de densité moyenne	$R_{12}h$
				$1,5 < \rho d \leq 1,7$ et $22 \leq w_n < 27$		$R_{12}m$
				$1,5 < \rho d \leq 1,7$ et $18 \leq w_n < 22$		$R_{12}s$
				$1,5 < \rho d \leq 1,7$ et $w_n < 18$		$R_{12}ts$
				$\rho d \leq 1,5$ et $w_n \geq 31$	craie peu dense	$R_{13}th$
				$\rho d \leq 1,5$ et $26 \leq w_n < 31$		$R_{13}h$
				$\rho d \leq 1,5$ et $21 \leq w_n < 26$		$R_{13}m$
				$\rho d \leq 1,5$ et $16 \leq w_n < 21$		$R_{13}s$
				$\rho d \leq 1,5$ et $w_n < 16$		$R_{13}ts$

Tableau II - Classification des matériaux rocheux R_1

1.4 -Classification des sols organiques et sous-produits industriels (classe F)

Cette dernière catégorie concerne des matériaux particuliers dont l'emploi en remblai et en couche de forme peut dans certains cas se révéler intéressant du point de vue technique et économique, à condition de ne pas nuire à l'environnement. Toutefois les critères au travers desquels il convient d'examiner chaque famille de matériaux entrant dans cette catégorie pour en déduire ses possibilités d'emploi sont à la fois très divers et spécifiques à la famille de matériaux considérée.

La classification proposée a été établie à partir du recensement des principales familles de matériaux de cette catégorie, susceptibles d'être concernées en France



Un sous-produit industriel : le phosphogypse (classe F_5). Ce matériau se présente sous l'aspect d'un sable très frottant mais légèrement soluble.

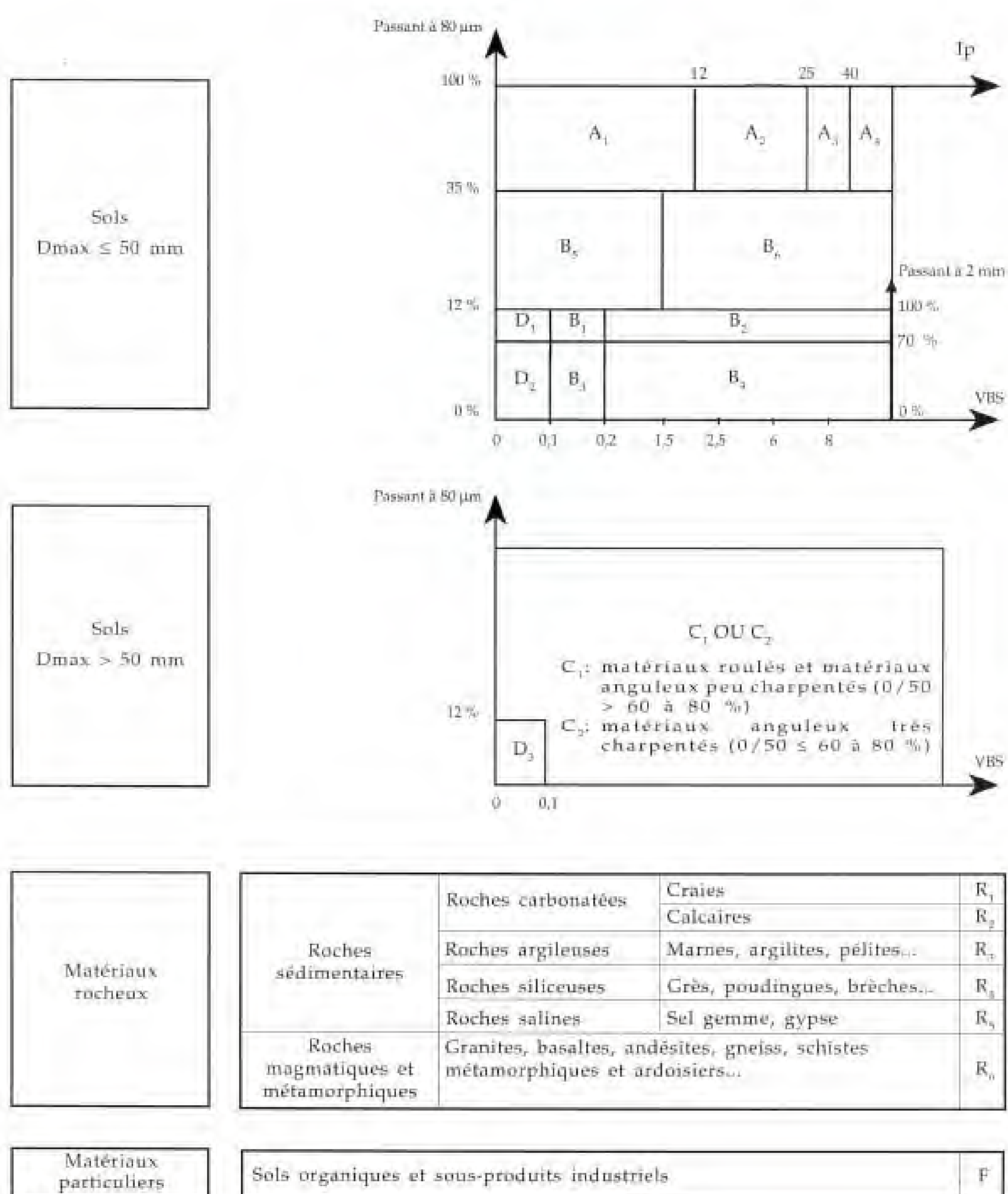
par une utilisation en remblai ou en couche de forme. On a ainsi dénombré neuf familles (sous-classes F_1 à F_9). Chacune d'elles est caractérisée par le (ou les) paramètre(s) duquel (ou desquels) dépendent les possibilités d'emploi. Lorsque l'expérience actuelle est suffisante, des valeurs seuils de ces paramètres sont proposées, permettant d'établir des distinctions à l'intérieur d'une même famille.

Le tableau III ci-après présente cette classification en se limitant toutefois à une définition générale des matériaux entrant dans chacune des neuf familles ainsi qu'à celle du (ou des) paramètre(s) considéré(s) comme significatif(s) vis-à-vis de leurs possibilités d'emploi. La classification complète de ces matériaux, avec les valeurs seuils des paramètres retenus ainsi que des commentaires explicatifs, est présentée dans l'annexe 1.

Famille de matériaux	Symbole	Paramètre(s) considéré(s) comme significatif(s) vis-à-vis du réemploi
Matériaux naturels renfermant des matières organiques	F_1	Teneur en matières organiques puis examen de leurs caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols A, B ou C.
Cendres volantes silico-alumineuses	F_2	Rapport entre leur teneur en eau naturelle et leur teneur en eau optimum Proctor normal et valeur de l'IPI à la teneur en eau naturelle.
Schistes houillers	F_3	Taux de combustion et examen de leurs caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols A, B, C, D ou aux matériaux rocheux.
Schistes des mines de potasse	F_4	Teneur en NaCl et pour ceux à faible teneur, examen de leurs caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols A, B ou C.
Phosphogypse	F_5	Mode d'obtention comportant ou non une neutralisation à la chaux, examen de la granulométrie et de la teneur en eau.
Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères	F_6	Taux d'imbrulés et d'éléments solubles, qualité du déferraillage, du criblage et de l'homogénéisation, durée du stockage, présence ou non de cendres volantes de combustion.
Matériaux de démolition	F_7	Qualité du déferraillage et de l'homogénéisation, présence d'éléments indésirables (plâtres, bois,...), granulométrie.
Laitiers de hauts-fournaux	F_8	Caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols B, C, D, ou aux matériaux rocheux.
Autres sous-produits industriels	F_9	Paramètres à définir à l'appui d'une étude spécifique.

Tableau III - Classification générale des sols organiques, sous-produits industriels (classe F)

1.5 - Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature (tableau IV)



Matériaux rocheux	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R_1
			Calcaires	R_2
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R_3
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R_4
		Roches salines	Sel gemme, gypse	R_5
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R_6

Matériaux particuliers	Sols organiques et sous-produits industriels	F

Chapitre 2

Conditions d'utilisation des matériaux en remblai

2.1 - Principes retenus

Les conditions d'utilisation des sols, des matériaux rocheux, des sous-produits industriels sont celles qu'il y a lieu de respecter pour autoriser l'emploi en remblai des différentes classes et sous-classes de matériaux qui sont distinguées dans la classification présentée dans le chapitre précédent.

Ces conditions sont exprimées, en exigences techniques directement intégrables dans les cahiers des charges des marchés pour obtenir la qualité généralement recherchée pour ces ouvrages.

Elles ont été définies dans le double souci :

- d'une part, de viser le juste niveau de qualité technique nécessaire compte tenu des possibilités des matériels d'exécution actuels et des pratiques habituelles,
- d'autre part, de tenir compte des coûts moyens des différentes techniques et méthodes utilisées actuellement dans les pays industrialisés. De ce fait il est possible que certaines conditions d'utilisation non envisagées dans le présent document puissent être retenues et donner satisfaction dans des contextes technico-économiques différents où ne s'appliquent pas les mêmes règles de délais de construction, de niveau de service ou de coût. En particulier, dans cet esprit, on a considéré que les matériaux sensibles à l'eau se trouvant dans un état hydrique très humide (th) ou très sec (ts) n'étaient pas réutilisables normalement dans les remblais ou les couches de forme (cf. 1.2.1).

2.2 - Présentation des tableaux des conditions d'utilisation des matériaux en remblai

Pour chaque classe ou sous-classe de matériaux définie dans la classification, les tableaux figurant en annexe 2 (dont un extrait est présenté au § 2-5 du présent chapitre), indiquent les conditions de mise en œuvre à respecter en fonction de la situation météorologique constatée au moment où le matériau est mis en remblai. Ne sont indiquées dans ces tableaux que les conditions particulières qui sont considérées comme nécessaires dans chaque cas à l'obtention de la qualité.

Les tableaux comportent cinq colonnes :

- **dans la première colonne** est indiqué le cas envisagé, défini par la classe, la sous-classe et l'état du matériau. Lorsque l'état est caractérisé par la teneur en eau, il s'agit de l'état hydrique constaté à l'extraction. Cet état hydrique peut être plus ou moins modifié au moment de la mise en remblai suivant la situation météorologique du moment et suivant la technique de mise en œuvre adoptée. C'est d'ailleurs un des intérêts du document que de faire apparaître la technique de mise en œuvre à respecter pour tirer le meilleur profit de la situation météorologique,
- **la deuxième colonne** comporte, dans un but pédagogique, des observations

générales sur le comportement du matériau considéré. Ces observations contribuent à la justification technique des conditions d'utilisation proposées,

- **la troisième colonne** concerne la situation météorologique durant l'extraction et la mise en remblai. Pour chaque cas, les différentes situations météorologiques pouvant se présenter sont envisagées. Elles sont désignées par les signes ++, +, =, -. Ces symboles expriment le sens dans lequel a tendance à varier la teneur en eau en fonction de la situation météorologique :

++ exprime que la situation météorologique a pour effet d'accroître la teneur en eau du matériau de manière brutale et imprévisible. Ce cas est traduit dans les tableaux par l'expression "pluie forte",

\+ exprime que la situation météorologique a pour effet d'accroître la teneur en eau de manière lente et relativement prévisible. Ce cas est traduit dans les tableaux par l'expression "pluie faible",

= exprime que la situation météorologique n'a pas d'action sensible sur la teneur en eau du matériau considéré. Ce cas est traduit dans les tableaux par l'expression "ni pluie - ni évaporation importante",

\- exprime que la situation météorologique a pour effet de diminuer la teneur en eau du matériau (il s'agit toujours d'une diminution qui peut être considérée comme relativement prévisible sous les climats français). Ce cas est traduit dans les tableaux par l'expression "évaporation importante".

Ces symboles ne correspondent pas à des seuils quantifiables des paramètres décrivant la situation météorologique (hauteur ou intensité de pluie par exemple) car les effets de la pluie ne sont pas indépendants du vent, de la température et du sol lui-même. C'est au géotechnicien du chantier qu'il appartient de caractériser la situation météorologique au moment de la mise en œuvre avec tout le "métier" qui s'impose. Dans le contexte actuel des travaux de terrassement il paraît difficile de vouloir aller au-delà de cette appréciation forcément toujours un peu subjective.

- **Dans la quatrième colonne** figurent les conditions d'utilisation en remblai. Ces conditions s'appliquent au cas de matériau indiqué dans la première colonne dans l'hypothèse de la situation météorologique portée dans la troisième. Comme dans tout système de classification un cas de matériau donné dans un état donné représente en fait une certaine gamme de possibilités comprises entre des limites inférieure et supérieure. Les conditions d'utilisation indiquées visent donc la situation moyenne du milieu de la gamme. Dans certains cas plusieurs solutions sont proposées et elles sont alors désignées par un titre soulignant l'aspect caractéristique de la solution. L'ordre de la présentation n'implique cependant pas entre elles de priorité ou de hiérarchie.
- **Dans la cinquième colonne** figurent des codes correspondants aux différentes conditions d'utilisation. L'utilité de ces codes est notamment de permettre une formulation rapide des conditions d'emploi lorsqu'une grande variété de sols doit être prise en compte dans un projet ainsi qu'une détection immédiate des éléments qui différencient deux ou plusieurs solutions.

2.3 -Commentaires sur les conditions d'utilisation présentées dans les tableaux

Les conditions d'utilisation en remblai présentées dans les tableaux se groupent en sept rubriques symbolisées par une lettre.

E : Extraction,
G : Action sur la granularité,
W : action sur la teneur en eau,
T : Traitement,
R : Régalage,
C : Compactage,
H : Hauteur des remblais.

- Rubrique E : Extraction

Le mode d'extraction des déblais peut interférer sensiblement sur la qualité des remblais dans la mesure où :

- l'extraction en couche (d'épaisseur de l'ordre de 0,1 à 0,3 m) permet une bonne fragmentation et un tri relatif des différentes couches de matériaux. Elle a la particularité d'exposer au maximum les sols aux agents atmosphériques, ce qui selon les cas peut-être un effet recherché ou au contraire contre-indiqué,
- l'extraction frontale se caractérise évidemment par des effets exactement opposés. Elle offre en plus la possibilité dans les formations stratifiées, de sélectionner le niveau présentant la meilleure portance pour le réserver à la circulation des engins de transport.



Le motor-scraper est l'engin d'extraction en couches minces par excellence.



L'extraction frontale (ou en butte), avec un atelier pelle - tombereaux.

- Rubrique G : Action sur la granularité

Dans cette rubrique sont envisagées différentes actions visant à modifier la granularité

du matériau entre son extraction et la fin de sa mise en remblai. Parmi ces actions figurent :

- l'élimination des éléments > 800 mm. Cette valeur constitue en effet une limite maximum des blocs admissibles dans le corps d'un remblai compte tenu des performances des compacteurs les plus puissants actuellement,
- l'élimination des éléments > 250 mm. Cette valeur constitue la dimension maximale des blocs permettant encore un malaxage du sol avec un agent de traitement,
- la fragmentation complémentaire après extraction. Cette modalité s'applique aux matériaux rocheux évolutifs. L'objectif recherché est d'obtenir un matériau ayant à la fois un Dmax compatible avec les compacteurs utilisés et une courbe granulométrique la plus étalée possible de manière à prévenir au maximum ses possibilités d'évolution à long terme. Cette condition implique évidemment l'élimination des éléments > 800 mm.

Les moyens utilisables pour agir sur la granularité sont variés : pétardage, concassage, utilisation d'engins spéciaux tels que rouleaux à pieds "dameurs", chenillage avec de gros bouteurs, fragmentation à l'aide de marteaux ou burins hydrauliques, etc.

- Rubrique W : Action sur la teneur en eau

Il s'agit des différentes mesures pouvant être prescrites pour modifier l'état hydrique des matériaux et notamment : l'aération par conditions météorologiques favorables ou l'humidification.

Pour ce qui concerne l'humidification, il convient de distinguer deux modalités.

La première consiste en un arrosage simple durant la mise en œuvre. Elle n'a pour objectif que de maintenir l'état hydrique du matériau lorsque les conditions météorologiques sont "évaporantes".

La seconde modalité vise quant à elle, le changement d'état hydrique du matériau. Dans ce cas il faut être conscient qu'il s'agit d'une opération délicate qui exige de grandes quantités d'eau et le recours à un brassage ou un malaxage pour la faire pénétrer au sein du matériau (une vérification de l'efficacité de l'opération s'impose avant d'en généraliser l'application sur tout un chantier).



L'humidification des sols trop secs nécessite d'approvisionner de grandes quantités d'eau (souvent plus de 100 litres d'eau par mètre cube de sol) comme le montrent les imposantes dimensions de l'arroseuse représentée sur la photo (100m³)

L'essorage par dépôt provisoire constitue également une modalité qu'il convient de préciser (délai d'essorage, mode de constitution des dépôts...) en fonction du chantier.

- Rubrique T : Traitement (1)

Cette rubrique concerne les actions de traitement des matériaux avec de la chaux ou d'autres réactifs (ciments, cendres volantes, laitiers ou autres sous-produits industriels éventuellement). Avec des sols fins moyennement ou très argileux, le traitement à la chaux occupe une place privilégiée au point qu'il soit justifié dans de nombreux cas de le recommander exclusivement.



Le traitement à la chaux vive constitue en général la meilleure solution pour réutiliser en remblai les sols sensibles à l'eau trop humides. Au cours de cette opération, la phase d'épandage de la chaux est souvent la plus délicate car il s'agit d'épandre la quantité nécessaire avec la précision requise dans des conditions d'évolution des engins forcément toujours difficiles.

Lorsqu'un traitement du matériau est préconisé cela implique qu'une étude particulière soit faite pour préciser la faisabilité et l'intérêt de cette solution, les dosages et éventuellement les difficultés d'exécution. Sur le chantier, ce dosage doit être choisi en fonction de l'état hydrique des matériaux, constaté au moment de la mise en remblai. En particulier dans une situation météorologique évaporante, l'évaporation produite par le malaxage peut être suffisante pour permettre l'économie d'une grande partie, voire de la totalité, du produit de traitement ; dans ce cas, il y a tout intérêt à imposer une aération simultanée avec le traitement.

Pour l'utilisation des matériaux en remblai, l'objectif du traitement est essentiellement la possibilité d'exécuter la mise en œuvre dans des conditions pratiques satisfaisantes. Par conséquent, on pourra en général se contenter d'un malaxage relativement sommaire avec des charrues. Pour les mêmes raisons, l'action du produit de traitement peut ne pas avoir d'effet définitif sur le matériau dès lors qu'il a permis sa mise en œuvre correcte. L'absence de risques de gonflements doit cependant toujours être vérifiée.

(1) Des indications détaillées sur les conditions d'exécution des traitements de matériau en vue de leur utilisation en remblai seront fournis dans le document méthodologique (en préparation en 1992) "Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques et pouzzolaniques".



Dans la technique du traitement à la chaux vive des sols sensibles à l'eau, trop humides pour l'utilisation en remblai, le malaxage s'exécute généralement avec des charrues. Les charrues à disques tractées telle que celle montrée sur la photo produisent une qualité de malaxage tout à fait satisfaisante pour cette nature de travaux mais leur profondeur de travail est faible (15 à 20 cm au maximum) et sujette à des variations non maîtrisables par le conducteur.



Les charrues à socs portés à l'arrière de tracteurs à chenilles de plus de 250 CV apparues récemment permettent de malaxer le mélange sol-chaux sur une épaisseur atteignant sans difficultés 0,50m, mais exigent un nombre de passes sensiblement supérieur pour obtenir une qualité de malaxage comparable à celle produite par la charrue à disques.

- **Rubrique R : Régalage**

Sous cette rubrique est donnée une indication sur l'épaisseur des couches élémentaires à mettre en œuvre. Il ne s'agit que d'une indication approximative compte tenu des méthodes de régalage utilisées en terrassement.

Cette notion d'épaisseur de régalage est cependant très importante pour la qualité de la mise en œuvre. On peut être amené à imposer pour une classe de matériau donnée un régalage en couche mince indépendamment des considérations liées au compactage, par exemple pour :

- garantir l'obtention de la fragmentation complémentaire de certains matériaux rocheux évolutifs,
- rechercher une mise à profit maximum de la situation météorologique (aération ou humidification des matériaux).

Pour fixer les idées, on peut retenir :

- qu'une couche "mince" a une épaisseur de 20 à 30 cm,
- qu'une couche "moyenne" a une épaisseur de 30 à 50 cm.

Il va de soi que la préconisation d'une couche moyenne autorise *a fortiori* l'exécution d'une couche mince et que lorsqu'aucune modalité de régalage n'est préconisée, l'épaisseur maximale des couches élémentaires est définie par l'épaisseur de compactage possible sur le matériau envisagé avec le compacteur utilisé. Ces valeurs sont indiquées dans les tableaux de compactage de l'annexe 4.

Dans le cas des matériaux rocheux, le régalage doit systématiquement être réalisé par déchargement des matériaux à la partie supérieure de la couche en cours de mise en œuvre et poussage dans le talus de la couche à l'aide d'un bouteur de forte puissance (cf. schéma figure 3).

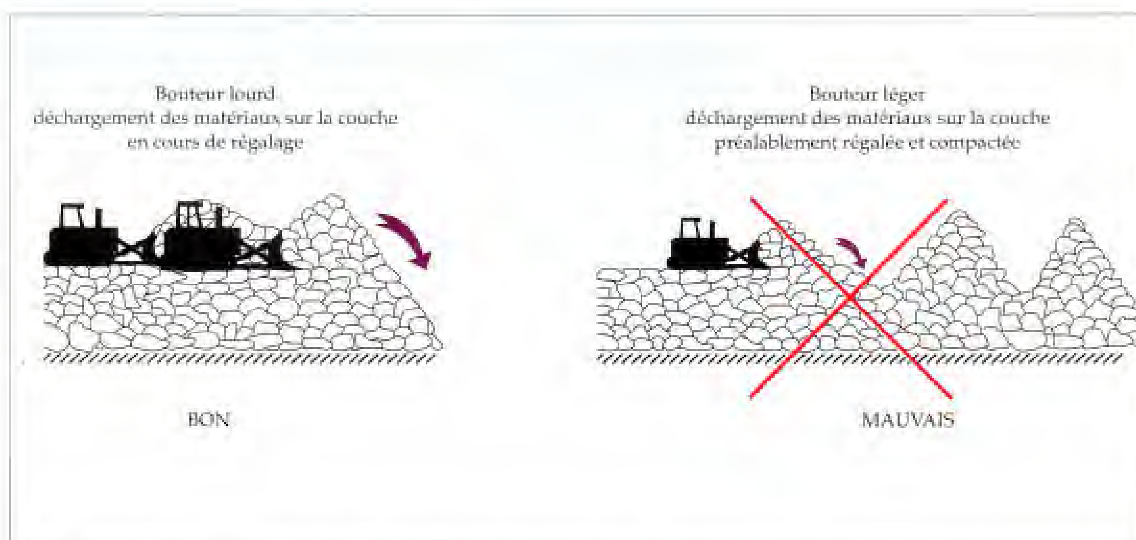


Figure 3 - Schéma de la mise en oeuvre des matériaux rocheux à recommander

- Rubrique C : Compactage

Trois niveaux d'énergie sont distingués : faible, moyen, intense. Comme pour les épaisseurs de régalage il s'agit d'une indication qualitative sur le niveau d'énergie de compactage requis par les différents matériaux. Les données quantitatives répondant précisément au cas de chantier considéré (couple matériau - compacteur) figurent dans le chapitre 4 "Compactage des remblais et des couches de forme" et dans l'annexe 4. De manière générale le compactage "faible" doit être appliqué aux matériaux humides pour éviter leur mise en saturation et le compactage intense aux matériaux secs.

- **Rubrique H : Hauteur des remblais**

L'existence de cette rubrique tient au fait que les possibilités d'utilisation des matériaux sont fonction de la hauteur du remblai. Il est donc précisé sous cette rubrique que certaines conditions de mise en œuvre, qui sont acceptables pour des remblais de faible hauteur, ne doivent pas être employées pour des remblais plus élevés car elles introduiraient des risques excessifs du point de vue du tassement ou de la stabilité. Il est à rappeler qu'il ne s'agit ici que de la stabilité et du tassement propres du corps de remblai. La question du comportement du sol de fondation doit être prise en considération par ailleurs.



Les remblais de grande hauteur doivent être conçus comme des ouvrages d'art... (cf : Instruction technique du 19 octobre 1979)

En particulier, toutes les solutions qui parient sur l'amélioration des matériaux apportée par la situation météorologique n'offrent pas de garantie suffisante pour être admises dans la construction des remblais de grande hauteur.

Pour fixer les idées on considère :

- que les remblais de faible hauteur sont limités à 5 m,
- que les remblais de hauteur moyenne sont limités à 10 m,
- que les remblais de grande hauteur dépassent 10 m.

Lorsqu'une condition d'utilisation n'est pas autorisée pour la réalisation d'un remblai de grande hauteur ou de hauteur moyenne, cela peut s'interpréter comme interdisant l'application de cette condition dans la construction de la partie basse (partie située en dessous des 5 mètres supérieurs du remblai) mais qu'en revanche les 5 mètres supérieurs de l'ouvrage peuvent être construits en suivant cette condition. Il convient cependant d'être prudent dans cette interprétation car il n'est pas en général souhaitable de construire de grands ouvrages avec des parties en matériaux ayant des comportements mécaniques ou hydrauliques très différents. Par conséquent la décision de s'en remettre à cette interprétation doit résulter d'une réflexion prenant en compte l'ensemble des données techniques, économiques et organisationnelles particulières à l'ouvrage considéré. A ce sujet, il convient de rappeler que dans tous les cas, les grands remblais doivent être conçus comme des ouvrages d'art, définis individuellement dans le marché et suivis de telle sorte qu'ils puissent faire l'objet d'un dossier d'ouvrage (cf. Instruction technique du 19 octobre 1979).

2.4 - Tableau récapitulatif des conditions pouvant être imposées pour utiliser les différents matériaux en remblai (tableau V)

Rubrique	Code	Conditions d'utilisation
E Extraction	0 1 2	Pas de condition particulière à recommander Extraction en couches (0,1 à 0,3m) Extraction frontale (pour un front de taille > 1 à 2m)
G Action sur la granularité	0 1 2 3	Pas de condition particulière à recommander Elimination des éléments > 800mm Elimination des éléments > 250 mm pour traitement Fragmentation complémentaire après extraction
W Action sur la teneur en eau	0 1 2 3 4	Pas de condition particulière à recommander Réduction de la teneur en eau par aération Essorage par mise en dépôt provisoire Arrosage pour maintien de l'état Humidification pour changer d'état
T Traitement	0 1 2	Pas de condition particulière à recommander Traitement avec un réactif ou un additif adaptés Traitement à la chaux seule
R Régalage	0 1 2	Pas de condition particulière à recommander Couches minces (20 à 30 cm) Couches moyennes (30 à 50 cm)
C Compactage	1 2 3	Compactage intense Compactage moyen Compactage faible
H Hauteur des remblais	0 1 2	Pas de condition particulière à recommander Remblai de hauteur faible (≤ 5m) Remblai de hauteur moyenne (≤ 10m)

Remarque

Lorsque l'on considère ce tableau, on constate que pour toutes les rubriques, exceptée celle relative au compactage, l'éventualité de n'avoir pas de condition d'utilisation particulière à formuler existe. Dans le cas du compactage, le projeteur sera donc toujours tenu de prescrire l'énergie de compactage à appliquer. En particulier la condition "compactage faible" ne peut en aucun cas être assimilée à une absence de condition particulière à recommander (code 0) car elle implique d'une part un niveau de compactage bien précis à appliquer, et d'autre part des sujétions de chantier particulières telles que l'interdiction aux engins de transport de circuler sur les ouvrages en cours de construction, etc.

2.5 -Exemple de tableau des conditions d'utilisation des matériaux en remblai

Le tableau VI ci-après, extrait de l'annexe 2, reproduit les conditions d'utilisation à appliquer à la sous-classe de sol A_2h.

A_1 (états s et ts), A_2 (états th et h)

Sol	Observations générales		Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblai	Code						
					E	G	W	T	R	C	H
A_2h	Ces sols sont difficiles à mettre en œuvre en raison de leur portance faible. La mise en dépôt provisoire et le drainage préalable ne sont habituellement pas des solutions envisageables dans le climat français moyen. Le malaxage est à éviter au niveau de l'arase-terrassement.	+	pluie faible	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON						
		=	ni pluie, ni évaporation importante	**Solution 1 : traitement** T : traitement à la chaux C : compactage faible	0	0	0	2	0	2	0
				Solution 2 : utilisation en l'état C : compactage faible H : remblai de faible hauteur (≤ 5 m)	0	0	0	0	0	3	1
		–	évaporation importante	**Solution 1 : aération** E : extraction en couches W : réduction de la teneur en eau par aération R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	1	0	1	0	1	2	2
				Solution 2 : traitement T : traitement à la chaux C : compactage moyen	0	0	0	2	0	2	0

Tableau VI - Conditions d'utilisation en remblai des sols de la sous-classe A_2h

Remarque

L'examen de ce tableau met en évidence la formulation extrêmement synthétique du libellé de ces conditions. Cette formulation est particulièrement adaptée à une traduction directe en terme de prescriptions dans les cahiers des charges.

Cependant, sur le chantier, il est clair que de telles prescriptions ne sauraient être appliquées sans un minimum d'interprétation fondée sur le "métier" de celui qui a la charge de les faire respecter. Ainsi dans l'exemple du sol A_2h ci-dessus, il serait évidemment aberrant d'ordonner l'arrêt de la mise en œuvre de ce type de sol par situation météorologique très évaporante, si l'état hydrique est assez voisin de l'état moyen et, si la hauteur du remblai à réaliser est de l'ordre de 6 à 7 m, sous prétexte que l'atelier ne permet pas l'extraction en couches minces. En revanche, une grande attention devra être portée à la bonne exécution de l'aération à la mise en remblai.

Chapitre 3

Conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

3.1 - Conception de la couche de forme

3.1.1 - Définition et nature de la couche de forme

La couche de forme est une structure plus ou moins complexe permettant d'adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place, aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception de la chaussée.

La surface supérieure de cette structure d'adaptation constitue la "plate-forme support de chaussée" (PF).

On désigne par **Partie Supérieure des Terrassements** ou PST la zone supérieure (environ un mètre d'épaisseur) des terrains en place (cas des profils en déblai) ou des matériaux rapportés (cas des profils en remblai). La plate-forme de la PST est **l'Arase de terrassement** AR (figure 4).

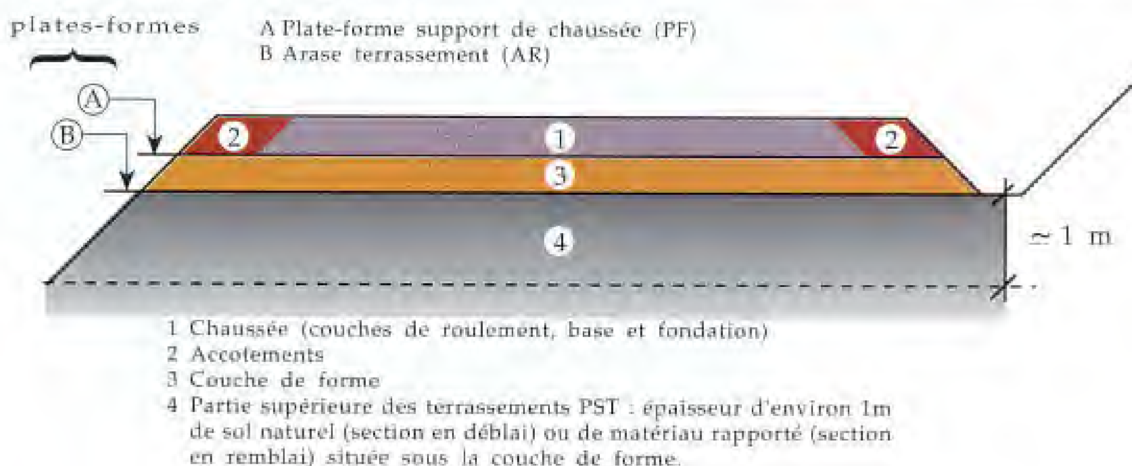


Figure 4. - Définition des différents termes

Selon les cas de chantier (nature des sols, climat, environnement hydrogéologique, trafic de chantier...) la couche de forme se présentera sous des formes différentes. Elle peut être :

- inexistante car inutile lorsque les matériaux constituant le remblai ou le sol en place ont eux-mêmes les qualités requises,
- limitée à l'apport d'une seule couche d'un matériau ayant les caractéristiques nécessaires ; c'est le concept traditionnel de la couche de forme,
- constituée d'une superposition de couches de matériaux différents répondant à des fonctions distinctes, incluant par exemple un géotextile, des matériaux grossiers, une couche de fin réglage, un enduit gravillonné... Cette association conçue rationnellement permet de former une structure d'adaptation dont la surface présente les caractéristiques requises pour une plate-forme support de chaussée.

3.1.2 - Fonctions et conception de la couche de forme

La couche de forme répond à la fois à des objectifs de court terme (vis-à-vis de la phase de réalisation de la chaussée) et de long terme (lorsque l'ouvrage est en service). Selon les cas de chantier, on cherchera à assurer, avec la couche de forme, l'ensemble ou certaines des fonctions suivantes.

A court terme (figure 5) :

- un nivellement de la plate-forme support de chaussée permettant de réaliser la couche de fondation dans les tolérances d'épaisseur fixées,
- une portance suffisante, compte tenu en particulier des aléas météorologiques, pour une exécution correcte du compactage des couches de chaussées et l'obtention d'un bon uni,
- une protection du sol support vis-à-vis des intempéries,
- une traficabilité permettant la circulation, dans de bonnes conditions, des engins approvisionnant les matériaux de la couche de fondation,
- éventuellement supporter le trafic de chantier pour d'autres besoins.



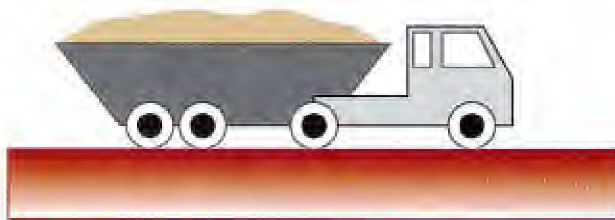
Une des fonctions "à court terme" primordiales de la couche de forme : assurer la circulation dans les meilleures conditions des engins approvisionnant les matériaux de la couche de fondation.

A long terme :

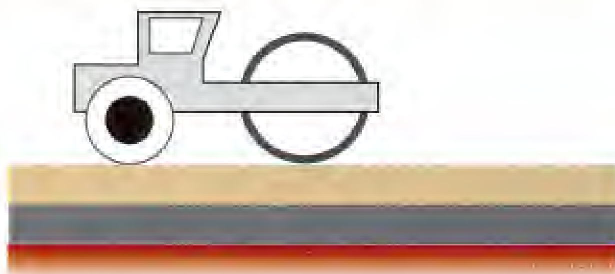
- l'homogénéisation de la portance du support pour concevoir des chaussées d'épaisseur constante,
- le maintien dans le temps, en dépit des fluctuations de l'état hydrique des sols supports sensibles à l'eau, d'une portance minimale pouvant être estimée avec une précision suffisante au stade du dimensionnement de la structure de chaussée,
- une amélioration de la portance de la plate-forme pour optimiser le coût de l'ensemble couche de forme - structure de chaussée,
- la protection thermique des sols supports gélifs,
- une contribution au drainage de la chaussée,
- etc.

Dans un certain nombre de situations correspondant à de petits ou moyens chantiers, l'épaisseur de la couche de forme est fixée avec le seul objectif de permettre la réalisation

Figure 5 - Les fonctions " à court terme" de la couche de forme



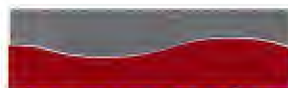
Assurer la traficabilité quasi tout temps des engins approvisionnant les matériaux de la couche de fondation.



Permettre le compactage efficace de la couche de fondation



PST en matériaux grossiers



PST en sol mou

Satisfaire les exigences de nivellement de la plate-forme support de chaussée.



Assurer la protection de l'arase terrassement vis à vis des agents climatiques dans l'attente de la réalisation de la chaussée.

de la chaussée, dans des conditions météorologiques favorables, en assurant les fonctions "à court terme" définies précédemment. Cette démarche peut alors conduire à retenir une couche de forme de plus faible épaisseur que celle préconisée dans le présent document. Mais dans ce cas, l'épaisseur de la couche de forme sera en général insuffisante pour :

- améliorer de façon sensible la portance à long terme des sols supports,
- réduire l'influence des variations de portance des sols supports sensibles à l'eau,
- obtenir une faible dispersion et la pérennité des caractéristiques mécaniques de la couche de forme (dans le cas des matériaux traités).

Il faudra alors admettre qu'il ne sera pas tenu compte d'un quelconque effet mécanique de cette couche de forme dans le dimensionnement de la chaussée.

A l'inverse, l'optimisation du coût du projet terrassement-chaussée peut être étudiée avec des épaisseurs et des performances de la couche de forme supérieures aux valeurs préconisées dans le présent document.

En ce qui concerne enfin la conception du projet terrassement-chaussée :

- dans tous les cas, c'est au niveau de la couche de forme que la question de la protection au gel du sol-support doit être examinée car c'est là en général que la protection recherchée peut être obtenue au moindre coût,
- dans la réflexion sur la conception du drainage des eaux d'infiltration à travers le corps de chaussée et les accotements, le choix des dispositions constructives devra être cohérent avec les caractéristiques hydrauliques des matériaux de la couche de forme.

Il s'avère ainsi que la conception de la couche de forme requiert une réflexion renouvelée à chaque chantier pour tenir compte des objectifs visés et des conditions de réalisation des travaux. Cette réflexion doit notamment considérer :

- l'aptitude des matériaux disponibles à être employés en couche de forme,
- l'épaisseur de la couche de forme à réaliser selon les matériaux retenus, les conditions de chantier et la saison durant laquelle les travaux de terrassements et de chaussées seront exécutés,
- les gains éventuels sur le coût global de la chaussée, tirés d'un accroissement d'épaisseur de la couche de forme.

3.1.3 - Critères associés à la construction de la chaussée

En premier lieu, pour que la couche de forme puisse être exécutée de manière satisfaisante, il est nécessaire que l'orniérage de l'arase des terrassements soit limité, ce qui amène à rechercher à ce niveau une portance minimale à court terme. L'expérience montre qu'une valeur de module EV2 à la plaque (ou module équivalent à la dynaplaque) de l'ordre de 35 MPa est généralement nécessaire pour mettre en œuvre une couche de forme en matériaux traités, tandis qu'une couche de forme en matériaux granulaires peut être exécutée sur une arase de 15 à 20 MPa seulement.

Pour la réalisation des couches de chaussée, les exigences minimales préconisées antérieurement sont maintenues :

- la plate-forme support de chaussée doit être nivelée avec une tolérance de + ou - 3 cm,
- la déformabilité de la plate-forme, au moment de la mise en œuvre des couches de chaussée, doit être telle que :
  * le module EV2 déterminé à la plaque, ou le module équivalent à la dynaplaque soit supérieure à 50 MPa
  ou
  * la déflexion relevée au déflectographe Lacroix ou à la poutre Benkelman sous essieu de 13 tonnes soit inférieure à 2 mm.

Dans certaines conditions, comme celles de grands chantiers sur lesquels la circulation sur la couche de forme sera importante, ou du fait de la nature des matériaux de la couche d'assise et des conditions d'exécution de chantier envisagées (épaisseurs et matériels de compactage), il pourra s'avérer utile d'adopter des seuils plus exigeants. Mais cela ne doit pas être systématique et doit être raisonné.

3.2 - Matériaux de couche de forme

Pour qu'un matériau puisse être employé en couche de forme il faut qu'il satisfasse aux critères définis ci-après. Certains matériaux pourront être utilisés en l'état, d'autres pourront être rendus aptes à un emploi en couche de forme moyennant une modification de leur nature et/ou de leur état par une technique appropriée décrite en 3.3.2.

3.2.1 - Critères à satisfaire

Les critères à prendre en considération concernent :

- l'insensibilité à l'eau,
- la dimension des plus gros éléments,
- la résistance sous circulation des engins de chantier,
- l'insensibilité au gel, le cas échéant.

Le respect de l'ensemble de ces critères est impératif dans le cas des grands chantiers. Dans les autres cas, certaines exigences telles que la traficabilité tout temps, peuvent être tempérées. A chaque fois, c'est à l'ingénieur d'apprécier les écarts admissibles en fonction des risques encourus en particulier sur les délais d'exécution.

Insensibilité à l'eau

Le matériau de couche de forme doit avoir des caractéristiques mécaniques indépendantes de son état hydrique, soit à l'état naturel, soit par une modification appropriée (traitement avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques, élimination de la fraction 0/d...), de manière à garantir :

- à court terme, pour la saison prévue pour l'exécution des travaux, la circulation quasi tout temps des engins approvisionnant les matériaux de chaussée,
- à long terme, le maintien des caractéristiques mécaniques de cette couche quel que soit l'état hydrique sous la chaussée en service.

Les sols traités restent souvent sensibles à l'eau au jeune âge. Le choix du liant et de son dosage doivent en tenir compte. Cette sensibilité à l'eau est appréciée à partir de la chute de résistance en traction après immersion (1).

Dimension des plus gros éléments

La dimension des plus gros éléments doit permettre d'assurer un nivellement de la plate-forme dans les tolérances requises, en général + ou - 3 cm (cf. 3.1.3), et le cas échéant, un malaxage intime avec les produits de traitement.

Résistance au trafic de chantier

Un matériau de couche de forme, utilisé sans traitement avec un liant hydraulique, doit être suffisamment résistant à la fragmentation et à l'attrition pour ne pas donner lieu, sous l'effet du compactage et du trafic, à la formation d'éléments fins en surface qui le rendraient sensible à l'eau. Cette résistance est appréciée à partir des résultats d'essais mécaniques (Los Angeles, micro-Deval en présence d'eau, friabilité des sables).

Il faut encore que sa résistance aux efforts tangentiels transmis par les pneumatiques (en accélération, virage, freinage) soit suffisante pour éviter tout risque d'enlisement (problèmes rencontrés surtout avec les matériaux granulaires homométriques roulés).

Sensibilité au gel

L'incidence néfaste du gel s'apprécie sous deux aspects :
- la dégradation des roches et des matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques par "gélifraction",
- le gonflement au gel des sols par "cryosuccion".

Gélifraction

L'action répétée du gel sur des granulats saturés d'eau peut provoquer une dégradation de ceux-ci par fragmentation ou microfissuration, particulièrement lorsqu'ils sont issus de roches poreuses. Cette sensibilité au gel est appréciée par un essai normalisé : "Sensibilité au gel" (norme P 18-593). En général, pour les matériaux granulaires non traités de couche de forme, vis-à-vis du long terme, il n'y aura pas lieu de se préoccuper de ce phénomène.

(1) Des indications pour ces études sont données dans le document : "Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques et pouzzolaniques" (document en préparation en 1992).

Dans le cas de matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, le gel peut provoquer la rupture de liaisons intergranulaires créées par la prise hydraulique du liant, du fait du gonflement de l'eau interstitielle au cours de sa solidification. Cette sensibilité au gel est appréciée par "l'essai de gélifraction des matériaux traités". Pour que le matériau traité soit utilisable en couche de forme, la différence de résistance en traction mesurée à 28 jours, entre une éprouvette témoin et l'éprouvette soumise aux cycles de gel définis par l'essai, ne doit pas excéder 50 %.

Cryosuccion

Le phénomène de cryosuccion se traduit par deux conséquences vis-à-vis de la chaussée : un gonflement du support pendant la phase de gel et, pour certains sols, une réduction importante de portance au moment du dégel. Cette susceptibilité au gel est appréciée par l'essai de laboratoire : "Essai de gonflement au gel, d'un matériau O/20" (norme P98-234.2).

Pour qu'un matériau soit utilisable en couche de forme il doit être "non gélif" au sens de cet essai, c'est-à-dire que la valeur de la pente décrivant le gonflement soit inférieure à 0,05 mm / $\sqrt{°C \text{ heure}}$. Cependant, pour que la sensibilité au gel se manifeste effectivement en place, il faut par ailleurs une forte teneur en eau initiale et une possibilité d'alimentation en eau, éléments dont il sera tenu compte dans le diagnostic porté sur le risque associé au gel.

3.2.2 - Techniques de préparation et de protection des matériaux pour emploi en couche de forme

Ces techniques sont répertoriées et codifiées dans le tableau VII. Ce tableau est à l'image de celui relatif aux conditions d'utilisation des sols en remblai, mais ne comporte pas de rubrique sur les conditions de compactage. Le compactage exigé pour une couche de forme sera toujours poussé pour obtenir la qualité q3 (définie en 4.1), quels que soient les matériaux et la technique d'amélioration utilisée. Les valeurs des paramètres e et Q/S définissant le niveau de compactage requis sont données dans les tableaux de l'annexe 4.

Les techniques considérées se rangent en quatre rubriques.

Rubrique G : Actions sur la granularité

Les actions suivantes peuvent être envisagées :

- L'élimination de la fraction fine sensible à l'eau 0/d par criblage dans l'état naturel ou avec lavage-débourbage. La valeur de d souvent retenue est d'environ 10 mm. Des valeurs plus faibles peuvent être choisies notamment lorsque le criblage se fait par lavage. La technique peut encore s'avérer intéressante pour certains matériaux jusqu'à d = 20 mm. L'élimination de la fraction 0/d permet d'obtenir un matériau insensible à l'eau mais qui peut présenter une certaine instabilité sous trafic. Dans ce cas il convient de procéder à un sablage superficiel voire à une couche de fin réglage (cf. plus loin rubrique protection superficielle).

Dans les cas où cette modalité est prescrite, des valeurs des coefficients LA et MDE légèrement supérieures à celles indiquées en 1.2.1 peuvent être admises sans toutefois dépasser le seuil de 50.

- L'élimination de la fraction grossière ne permettant pas le malaxage du sol avec le ou les produit(s) de traitement, ou le réglage de la plate-forme conformément aux exigences imposées. En général, on retient pour la dimension maximale les valeurs suivantes :

  * 50 mm pour les matériaux devant être malaxés avec des produits de traitement (1)
  * 100 mm dans les autres cas.

L'élimination de la fraction grossière d'un matériau peut se faire selon différents modes : concassage, fragmentation en place à l'aide de briseurs de pierres, engins à chenilles et/ou rouleaux à grilles très lourds, écrétage par cribles mobiles, engins épierreurs...

Un grand nombre de matériaux exigent l'élimination de leur fraction grossière pour être utilisables en couche de forme. Pour ce faire, plusieurs techniques peuvent être envisagées, en particulier l'emploi de cribles mobiles tels que celui représenté sur les photos ci-dessous.



Chargement du crible.



Ejection des éléments grossiers par basculement de la grille actionnée par le godet du chargeur au cours de sa marche arrière.

- L'élimination à la fois de la fraction fine sensible à l'eau et de la fraction grossière.
- La fragmentation de la fraction grossière pour produire une certaine quantité d'éléments fins, afin d'obtenir l'enrobage des blocs en cas de traitement avec un liant hydraulique (cas des craies dures et moyennement dures ou des calcaires tendres).

Rubrique W : Actions sur l'état hydrique

Ces actions concernent surtout les matériaux sur lesquels on doit pratiquer un traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques pour les rendre aptes à un emploi en couche

(1) Des valeurs sensiblement supérieures peuvent être admises dans certains cas de chantiers avec des matériaux fragmentables par des malaxeurs très puissants.

de forme. Le respect d'un état hydrique aussi voisin que possible de la teneur en eau à l'optimum Proctor normal du mélange matériau-liant est indispensable pour obtenir les performances mécaniques élevées escomptables.

Les actions sur l'état hydrique envisageables sont :

- un arrosage pour maintenir la teneur en eau durant le malaxage et le compactage,
- une humidification de la masse du matériau pour ramener son état hydrique de sec à moyen. Dans ce cas, il faut être conscient que les quantités d'eau peuvent être importantes car il faut, d'une part apporter l'eau nécessaire à l'augmentation de la teneur en eau pondérale recherchée, et d'autre part compenser les pertes dues à l'évaporation durant le malaxage.

Rubrique T : Traitement

Cette rubrique rassemble les actions consistant à mélanger différents produits tels que la chaux (éventuellement sous forme de lait de chaux), des liants hydrauliques (ciment, cendres volantes, laitiers...) ou des correcteurs granulométriques, pour conférer au matériau des performances mécaniques supérieures à celles qu'il possède à l'état naturel, et durables tout au long de la vie de l'ouvrage.

Six modalités différentes de traitement sont envisagées. Ce nombre relativement élevé traduit le fait qu'il n'est souvent pas possible de se prononcer sur la technique de traitement la plus appropriée au projet, à partir de la seule donnée de la classe de sol ; il faut considérer aussi les conditions économiques.

Dans le cas du traitement avec de la chaux ou des liants hydrauliques il convient :

- de déterminer par une étude de laboratoire : le choix du ou des produits de traitement, les dosages nécessaires pour atteindre les performances mécaniques

Le traitement des sols constitue une technique attrayante pour constituer des couches de forme performantes à condition de "réaliser le traitement selon des modalités beaucoup plus rigoureuses que celles acceptables pour un traitement en remblai".



Epandeur moderne présentant un coefficient de variation voisin de 5%.



Malaxeur à arbre horizontal garantissant une épaisseur de couche de sol traité constante pouvant atteindre 0,35m avec une finesse de mouture remarquable.

recherchées, et la plage de teneur en eau du mélange sol-liant dans laquelle il est réaliste d'escompter obtenir ces résistances,

- de s'assurer de la pérennité des liaisons engendrées par le traitement (non apparition d'espèces cristallines gonflantes à moyen et long terme en particulier),
- de réaliser le traitement selon des modalités beaucoup plus rigoureuses que celles acceptables pour un traitement en remblai (utilisation d'épandeurs précis, de malaxeurs puissants à arbre horizontal et d'arroseuses réglables et fiables, élaboration éventuelle du mélange en centrale...) (1).

Suivant la nature et l'état des matériaux, le traitement à préconiser peut être :

- un traitement aux liants hydrauliques (ciment normalisé, liants spéciaux à usage routier, cendres volantes sulfocalciques, laitiers broyés...). Ce traitement est principalement adapté aux matériaux peu ou pas argileux. L'association de chaux pourra être retenue selon l'état hydrique,
- un traitement mixte chaux + ciment dans le cas des sols moyennement argileux,
- un traitement à la chaux seule. Ce traitement est plus spécialement adapté aux sols argileux et très argileux,
- un traitement associant liant hydraulique et correcteur granulométrique dans le cas de sols granulaires peu «traficables», si le bilan économique s'avère favorable par rapport au seul emploi de liant hydraulique,
- un traitement par apport d'un correcteur granulométrique. Dans ce cas, le malaxage et le dosage du correcteur n'exigent pas la même rigueur. Des techniques telles qu'un répandage du correcteur à la niveleuse et un malaxage à la charrue à disques, ou réalisé suivant la méthode dite de "dépôt-reprise" peuvent s'avérer suffisantes. Les caractéristiques du correcteur granulométrique doivent être validées par une étude géotechnique.

La nécessité de réaliser le réglage des plates - formes de couches de forme en sols traités exclusivement par rabotage constitue également une garantie de satisfaction des exigences de nivellement.



(1) Des indications détaillées sur les modalités d'étude et d'exécution des traitements des sols appliqués à la réalisation des couches de forme sont fournies dans le document : "Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques et pouzzolaniques" (en préparation en 1992).

On prendra en compte le cas échéant l'effet du gel, à la fois du point de vue du délai séparant l'exécution du traitement de l'apparition des périodes de gel, et sous l'angle de la résistance mécanique à viser pour résister aux contraintes engendrées par le gel (cf. 3.2.1).

Rubrique S : Protection superficielle

Les matériaux granulaires non traités utilisables en couche de forme requièrent souvent une protection de surface pour leur donner une résistance suffisante aux efforts tangentiels créés par les pneumatiques des engins (accélérations, freinages, virages), ou garantir les exigences de nivellement.

Dans le cas des matériaux traités à la chaux ou aux liants hydrauliques, ce rôle se double de celui, tout aussi important, de maintenir leur état hydrique relativement constant durant la période de prise et de durcissement. Ceci impose que la protection appliquée demeure peu perméable (vis-à-vis des percolations comme de l'évaporation) pendant le temps correspondant.

D'autres objectifs peuvent être encore poursuivis avec cette protection comme la recherche d'un bon accrochage avec la couche de fondation, la réduction des poussières sous le trafic...

Protection superficielle des plates-formes de couches de forme en sols fins traités par un enduit de cure clouté.



Après épandage des gravillons de cloutage.



Répandage de l'émulsion.

Suivant les matériaux de couche de forme utilisés, les techniques de protection superficielle pouvant être appliquées sont :

- un enduit de cure gravillonné ou éventuellement clouté. Ce type de protection qui fait appel à des émulsions de bitume s'applique tout particulièrement aux matériaux traités. Le choix entre gravillonnage ou cloutage est fonction de la granulométrie du matériau (les plus fins étant cloutés). L'absence de gravillonnage peut être envisagée quand le trafic à supporter est faible et que les matériaux sont d'origine assez "charpentés",

- une couche de fin réglage. Il s'agit d'une couche de quelques centimètres d'épaisseur, constituée d'un granulat très frottant, qui est réalisée à la surface d'une couche de forme en matériau granulaire insensible à l'eau mais relativement grossier. Elle peut se réduire à un simple sablage superficiel (à raison de 7 à 10 litre/m² d'un sable concassé 0/5) dans le cas de matériaux granulaires dont on a éliminé la fraction 0/d et dont le Dmax est inférieur à 50 mm.



Etat de la protection après avoir supporté le trafic de chantier.

Rubrique	Code	Technique de préparation des matériaux
G	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau
Action sur la granularité	2	Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol
	3	Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
	4	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
	5	Fragmentation de la fraction grossière pour l'obtention d'éléments fins
W	0	Pas de condition particulière à recommander
Action sur la	1	Arrosage pour maintien de l'état hydrique
teneur en eau	2	Humidification pour changer d'état hydrique
T	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un liant hydraulique
Traitement	2	Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux
	3	Traitement mixte : chaux + liant hydraulique
	4	Traitement à la chaux seule
	5	Traitement avec un liant hydraulique et éventuellement un correcteur granulométrique
	6	Traitement avec un correcteur granulométrique
S	0	Pas de condition particulière à recommander
Protection	1	Enduit de cure éventuellement gravillonné
superficielle	2	Enduit de cure gravillonné éventuellement clouté
	3	Couche de fin réglage

Tableau VII - Tableau récapitulatif des techniques de préparation des matériaux pour emploi en couche de forme.

3.2.3 - Tableaux des conditions d'utilisation en couche de forme pour les différentes classes de matériaux

Les tableaux complets figurent dans l'annexe 3. A titre d'exemple, un extrait concernant les sols B_{41} est reproduit ci-après (Tableau VIII).

Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme sont données par les cinq premières colonnes de ces tableaux. Ces colonnes ont une présentation analogue à celle des conditions d'utilisation des matériaux en remblai (cf. 2.5). Les colonnes suivantes sont relatives au choix d'épaisseur de couche de forme ; leur contenu est décrit en 3.3.3.

On peut tirer de l'examen de cet extrait de tableau que :

- dans le cas des sols de la classe B_{41}, la possibilité existe d'utiliser des matériaux se trouvant à l'extraction dans un état très humide (th) ou très sec (ts) à condition d'en éliminer la fraction 0/d, ce qui a pour effet de les rendre insensibles à l'eau,
- chaque fois qu'un matériau peut être employé sans traitement avec un liant, une solution est aussi proposée avec traitement. Ces deux solutions ne sont évidemment pas équivalentes techniquement et économiquement. Il revient au projeteur de choisir en fonction de la stratégie qu'il s'est donné,
- l'utilisation en couche de forme de matériaux traités avec un liant n'est en principe pas autorisée par pluie même faible en raison de la nécessité d'avoir la maîtrise de l'état hydrique du mélange sol + liant.

B_{41}

Classe de sol	Observations générales	Situation météo-rologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée				
						PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4
						AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2
B_{41}th	Les sols de cette classe contiennent une fraction fine en faible quantité mais cependant suffisante pour leur conférer une grande sensibilité à l'eau. Leur fraction grenue est résistante et ne risque donc pas de se broyer sous l'action du trafic. Pour utiliser ces sols en couche de forme deux solutions sont applicables: a) Eliminer par tout moyen ad hoc la fraction o/d responsable de la sensibilité à l'eau. Le matériau ainsi élaboré devient insensible à l'eau et peut être utilisé en toutes situations météo. Il est toutefois conseillé de répandre en surface une couche de fin réglage de 2 à 3 cm d'épaisseur d'un granulat frottant qui améliorera nettement la traficabilité. b) Traiter ces matériaux avec les liants hydrauliques en place (ou en centrale lorsqu'ils sont dans un état moyen ou sec).	++ ou + ou = ou -	toutes conditions météo	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,8 ou (2) e = 0,65 PF2	e = 0,5 ou (2) e = 0,4 PF2	e = 0,4 ou (2) e = 0,3 PF2	e = 0,3 ou (2) e = 0,2 PF2	(3)
B_{41}h		++ ou +	pluie même forte	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3					
		= ou -	pas de pluie	**Solution 1 :** G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3					
				Solution 2 : T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 0 1 1	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
B_{41}m		++ ou +	pluie même forte	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,8 ou (2) e = 0,65 PF2	e = 0,5 ou (2) e = 0,4 PF2	e = 0,4 ou (2) e = 0,3 PF2	e = 0,3 ou (2) e = 0,2 PF2	(3)
		= ou -	pas de pluie	**Solution 1 :** G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3					
				Solution 2 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 1 1 1	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
B_{41}s		++ ou +	pluie même forte	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,8 ou (2) e = 0,65 PF2	e = 0,5 ou (2) e = 0,4 PF2	e = 0,4 ou (2) e = 0,3 PF2	e = 0,3 ou (2) e = 0,2 PF2	(3)
		= ou -	pas de pluie	**Solution 1 :** G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3					
				Solution 2 : W : Humidification pour changer l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 2 1 1	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
B_{41}ts		++ ou + ou = ou -	toutes conditions météo	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,8 ou (2) e = 0,65 PF2	e = 0,5 ou (2) e = 0,4 PF2	e = 0,4 ou (2) e = 0,3 PF2	e = 0,3 ou (2) e = 0,2 PF2	(3)

(1) Sur cette PST, la mise en œuvre d'un matériau traité répondant à une qualité "couche de forme" n'est pas réalisable. Procéder d'abord à un traitement selon une technique "remblai" et se rapporter alors au cas de PST n°4 si l'effet du traitement est durable et aux cas de PST n°2 ou 3 s'il ne l'est pas.
(2) Si intercalation d'un géotextile à l'interface PST-couche de forme.
(3) Dans le cas de la PST n°4, une couche de forme conduisant à une PF2 peut se limiter à une couche de protection superficielle de quelques centimètres d'épaisseur de ce matériau. Celle-ci peut même être inutile si l'on a prévu la possibilité d'éliminer par rabotage les 5 à 10 cm supérieurs de la PST. Elle peut également être remplacée par un enduit de cure gravillonné ou éventuellement clouté, appliqué directement sur l'arase terrassement.

Tableau VIII - Extrait du tableau des conditions d'emploi des sols en couche de forme relatives à la classe B_{41}

3.3 - Dimensionnement de la couche de forme

3.3.1 - Démarche pour fixer l'épaisseur

L'épaisseur de la couche de forme est déterminée au terme de la démarche suivante.

La classification géotechnique des sols et les conditions hydriques intéressant le mètre supérieur supportant la couche de forme, zone appelée "Partie Supérieure des Terrassements" (PST), permettent de distinguer 7 cas, présentés dans le tableau IX.

A chaque PST est associée une ou deux classe(s) de portance à long terme de l'arase de terrassement, notée(s) ARi.

Pour chaque cas de PST et pour les différents matériaux de couche de forme, il est alors préconisé une épaisseur de couche de forme (cf. 3.3.2 et tableaux de l'annexe 3).

Le calcul de la structure de chaussée et la vérification au dégel menés avec cette plate-forme, ou l'étude économique de l'ensemble terrassement-couche de forme-chaussée, pourront conduire à retenir une couche de forme de nature différente et d'épaisseur supérieure pour obtenir une plate-forme de meilleure portance. Pour faire cette étude d'optimisation, il faudra effectuer une étude spécifique pour préciser les caractéristiques mécaniques et les coûts des matériaux de couche de forme possibles, et d'autre part se référer aux documents de dimensionnement des chaussées.

3.3.2 - Les différents cas de Partie Supérieure des Terrassements (PST)

Le tableau IX distingue, selon la nature des matériaux et l'environnement hydrique, 7 catégories de Partie Supérieure des Terrassements notées de PST n° 0 à PST n° 6. Le cas de la PST n° 0 correspond à une situation impropre à la réalisation d'une plate-forme.

Les classes de portance de l'arase de terrassement introduites pour chaque cas de PST sont associées aux caractéristiques du sol support dites à long terme, c'est-à-dire représentatives des conditions hydriques défavorables que pourra connaître la plate - forme, pendant la durée de service de la chaussée (à l'exception du problème de gel-dégel traité à part). Le choix entre les classes ARi proposées est à faire selon les indications données dans la colonne commentaires du tableau.



Cas typique d'une PST n°0 impropre à la mise en oeuvre d'une couche de forme

TABLEAUX IX : DIFFERENTS CAS POSSIBLES DE P.S.T.

Cas de P.S.T	Schéma	Description	Classe de l'arase	Commentaires
P.S.T. n°0		**Sols** A, B_2, B_4, B_5, B_6, C_1 se trouvant dans un état hydrique (th). **Contexte** Zones tourbeuses, marécageuses ou inondables. PST dont la portance risque d'être quasi nulle au moment de la réalisation de la chaussée ou au cours de la vie de l'ouvrage.	**AR0**	La solution de franchissement de ces zones doit être recherchée par une opération de terrassement (purge, substitution) et/ou de drainage (fossés profonds, rabattement de la nappe...) de manière à pouvoir reclasser le nouveau support obtenu au moins en classe AR1.
P.S.T. n°1	(A) (B)	**Sols** Matériaux des classes A, B_2, B_4, B_5, B_6, C_1, R_{12}, R_{13}, R_{34} et certains matériaux C_2, R_{43} et R_{63} dans un état hydrique (h). **Contexte.** PST en matériaux sensibles de mauvaise portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) et sans possibilité d'amélioration à long terme (B).	**AR1**	Dans ce cas de PST, il convient : - soit de procéder à une amélioration du matériau jusqu'à 0,5 m d'épaisseur par un traitement principalement à la chaux vive et selon une technique remblai. On est ramené au cas de PST 2, 3 ou 4 selon le contexte. - soit d'exécuter une couche de forme en matériau granulaire insensible à l'eau de forte épaisseur (en admettant une légère réduction si l'on intercale un géotextile anticontaminant à l'interface PST - couche de forme).
P.S.T. n°2	(A) (B)	**Sols** Matériaux des classes A, B_2, B_4, B_5, B_6, C_1, R_{12}, R_{13}, R_{34} et certains matériaux C_2, R_{43} et R_{63} dans un état hydrique (m). **Contexte** PST en matériaux sensibles à l'eau de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A). Cette portance peut cependant chuter à long terme sous l'action des infiltrations des eaux pluviales et d'une remontée de la nappe (B).	**AR1**	Si l'on peut réaliser un rabattement de la nappe à une profondeur suffisante, on est ramené au cas de PST 3. Bien que les exigences requises à court terme pour la plate-forme support puissent être momentanément obtenues au niveau de l'arase, il est cependant quasiment toujours nécessaire de prévoir la réalisation d'une couche de forme.
P.S.T. n°3	(A) (B)	**Sols** Mêmes matériaux que dans le cas de PST 2. **Contexte** PST en matériaux sensibles à l'eau, de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) mais pouvant chuter à long terme sous l'action de l'infiltration des eaux pluviales (B).	**AR1**	Mêmes commentaires qu'en PST 2 sur la nécessité de réalisation d'une couche de forme. Sans mesure de drainage.
			AR2	Classement en AR2 si des dispositions constructives de drainage à la base de la chaussée permettent d'évacuer les eaux et d'éviter leur infiltration.

P.S.T. n°4	Ⓐ Ⓑ	**Sols** Mêmes matériaux qu'en PST 1 sous réserve que la granularité permette leur traitement. **Contexte** PST en matériaux sensibles à l'eau (en remblai ou rapportés en fond de déblai hors nappe) ayant subi une amélioration à la chaux ou aux liants hydrauliques selon une technique "remblai" et sur une épaisseur de 0,30 à 0,50 m. L'action du traitement est cependant durable.	**AR2**	La portance de l'arase peut être localement élevée mais la dispersion n'autorise pas un classement supérieur. La décision de réalisation d'une couche de forme sur cette PST dépend du projet et des valeurs de portance de l'arase mesurées à court terme (après prise du liant).
P.S.T. n°5	Ⓐ Ⓑ	**Sols** B_1 et D_1 et certains matériaux rocheux de la classe R_{43}. **Contexte** PST en matériaux sableux fins insensibles à l'eau, hors nappe, posant des problèmes de traficabilité.	**AR2** **AR3**	La portance de l'arase de cette PST dépend beaucoup de la nature des matériaux. Classement en AR3 si le module EV2 de l'arase est supérieur à 120 MPa. Les valeurs de portance à long terme peuvent être assimilées aux valeurs mesurées à court terme. La nécessité d'une couche de forme sur cette PST ne s'impose que pour satisfaire les exigences de traficabilité.
P.S.T. n°6	Ⓐ Ⓑ	**Sols** Matériaux des classes D_3, R_{11}, R_{21}, R_{22}, R_{32}, R_{33}, R_{41}, R_{42}, R_{62} ainsi que certains matériaux C_2, R_{23}, R_{43} et R_{63}. **Contexte** PST en matériaux graveleux ou rocheux insensibles à l'eau mais posant des problèmes de réglage et/ou de traficabilité.	**AR3** **AR4**	Classement en AR3 si EV2 ≥ 120 MPa et en AR4 si EV2 ≥ 200 MPa. Les valeurs de portance à long terme peuvent être assimilées aux valeurs mesurées à court terme. La nécessité d'une couche de forme ne s'impose que pour les exigences à court terme (nivellement et traficabilité) et peut donc se réduire à une couche de fin réglage.

Ⓐ Comportement de la PST à la mise en œuvre de la couche de forme

Ⓑ Situation pendant la "phase de construction" de la chaussée.

3.3.3 - Epaisseur préconisée pour la couche de forme

L'épaisseur préconisée pour la couche de forme est fixée de sorte qu'elle :

- satisfasse aux divers critères de résistance permettant une mise en œuvre correcte des couches de chaussée,
- assure la pérennité d'une valeur minimale de portance à long terme de la plate-forme.

Cette épaisseur préconisée dépend :

- du cas de PST et de la portance à long terme au niveau de l'arase des terrassements,
- des caractéristiques du matériau constituant la couche de forme.

Les valeurs sont données dans les dernières colonnes des tableaux de l'annexe 3 sur les conditions d'utilisation des sols et des matériaux rocheux en couche de forme. Un extrait est présenté tableau VIII. Les valeurs proposées viennent de l'expérience de chantier et correspondent à des trafics courants de chantier (limités à l'approvisionnement des matériaux de la couche de fondation). Dans le cas de trafics plus élevés on majorera les épaisseurs préconisées de 10 à 20 cm.

Pour le cas de la PST n° 1, les épaisseurs de couche de forme en matériaux granulaires non traités préconisées, supposent une portance minimale au niveau de l'arase des terrassements de l'ordre de 15 à 20 MPa au moment de l'exécution.

Pour les cas des PST n° 5 et 6 constituées de matériaux insensibles à l'eau, la couche de forme préconisée se réduit à une couche de fin réglage ou à une protection de surface pour tenir les exigences de nivellement et résoudre les problèmes de traficabilité. Ces cas de PST ne sont pas détaillés dans les tableaux de l'annexe 3.

L'éventualité de l'intercalation d'un géotextile est prévue dans certains cas. Toutefois le document ne précise pas les caractéristiques du géotextile à utiliser. On se reportera pour cela au fascicule de recommandation "Emploi des géotextiles dans les voies de circulation provisoire, les voies à faible trafic et les couches de



L'intercalation d'un géotextile anti-contaminant entre une couche de forme en matériaux granulaires et un sol sensible à l'eau, humide permet de sauvegarder les caractéristiques du matériau granulaire et de réduire ainsi l'épaisseur de la couche de forme.

forme" établi par le Comité Français des Géotextiles et des Géomembranes. En particulier lorsqu'un drainage de l'arase Terrassement est recherché (cas de la PST n° 3 pour laquelle on vise une portance à long terme de niveau AR2) il y a avantage à utiliser des géotextiles anticontaminants-drainants.

D'autres commentaires sur les épaisseurs préconisées pour la couche de forme sont présentés dans le paragraphe suivant consacré au classement de la portance à long terme de la plate-forme.

3.4 - Classement des plates-formes pour le dimensionnement des structures de chaussée

3.4.1 - Portance à long terme de la plate-forme

Pour le dimensionnement des structures de chaussée, la portance à long terme de la plate-forme support de chaussée est déterminée à partir du couple PST - couche de forme.

On distingue 4 classes de portance des plates-formes définies par des plages de valeur de module de déformation réversible, selon le découpage donné par le tableau X.

Module (MPa)	< 20	20 – 50	50 – 120	120 – 200	≥ 200
Classe de plate-forme		PF1	PF2	PF3	PF4

Tableau X - Tableau définissant les classes de plate-forme PFi

Le classement de la plate-forme s'effectue ainsi :

- lorsque la couche de forme a au moins l'épaisseur préconisée par les tableaux de l'annexe 3, la classe de la plate-forme est indiquée dans ces mêmes tableaux selon la P.S.T. et la nature de la couche de forme.
- si l'épaisseur de la couche de forme est inférieure à la valeur préconisée, la classe de la plate-forme à retenir est celle de la classe de l'arase de terrassement.

Commentaires

Dans le cas de matériaux insensibles ou rendus insensibles à l'eau, ce qui est le cas des PST n° 4, 5 et 6, la portance à long terme au niveau de l'arase terrassement peut être valablement appréciée par des mesures de module à la plaque (ou autres) réalisées avant la mise en œuvre de la couche de forme.

Dans le cas de matériaux sensibles à l'eau, il sera souvent difficile d'être en mesure de déterminer par avance quelles seront ces caractéristiques à long terme. L'état hydrique est variable avec les saisons et sera influencé par les dispositions constructives du projet : la configuration géométrique de la chaussée et la topographie des lieux, l'efficacité des mesures de drainage, la perméabilité des couches de chaussée et des accotements, etc.

A défaut de pouvoir établir un diagnostic précis, on retiendra pour les calculs de chaussée, comme module d'Young du sol support les valeurs suivantes (tableau XI).

Module de calcul (MPa)	20	50	120	200
Classe de l'arase terrassement	AR1	AR2	AR3	AR4

Tableau XI - Tableau des modules de calcul descriptifs du sol support

- lorsque la couche de forme a une épaisseur supérieure à la valeur préconisée, la classe de la plate-forme sera déterminée, en se reportant aux règles données en 3.4.2 dans l'attente de nouveaux documents de dimensionnement des chaussées.

D'après les tableaux de l'annexe 3, on relève que la mise en œuvre d'une couche de forme ayant au moins l'épaisseur préconisée conduit à une plate-forme PF2 minimum.

Le cas d'une plate-forme PF1 peut être rencontré lorsque l'épaisseur de couche de forme mise en œuvre sur les cas de PST n° 1, 2 ou 3 est inférieure à la valeur préconisée.

Dans le cas de PST n° 3 ou 4 dont l'arase de terrassement est déjà de classe AR2, l'épaisseur de couche de forme en matériau non traité préconisée vise à satisfaire aux objectifs à court terme mais n'est pas suffisante pour atteindre un reclassement de la plate-forme en PF3 (pour ce faire, il faudrait satisfaire les règles données en 3.4.2, solution qui est rarement économique).

Dans le cas des PST n° 5 et 6, on adopte la classe de plate-forme PF3 ou PF4 suivant les caractéristiques mécaniques des matériaux qui les constituent. Ces valeurs doivent être validées par des mesures de portance réalisées après mise en œuvre de la couche de réglage ou de protection superficielle.

Pour les couches de forme en matériaux traités aux liants hydrauliques, une étude technico-économique est recommandée pour examiner si un reclassement de la plate-forme en PF3 ou PF4 (cf. 3.4.2) ne peut pas être obtenu moyennant une augmentation de l'épaisseur indiquée dans les tableaux.

Commentaires

Relation avec l'application de la méthode Alizé pour le calcul des structures de chaussées et l'emploi du catalogue 1977 des structures types de chaussées neuves.

Pour les classes de plate-forme définies précédemment, on retiendra comme module d'Young dans le calcul pour représenter l'effet mécanique de la plate-forme support de chaussée, les valeurs correspondant à la limite basse de la classe (Tableau XII).

Pour la classe PF4 le module de calcul est borné à 200 MPa. Pour les autres classes, les modules de calcul sont ceux retenus pour le dimensionnement des structures du catalogue 1977.

Module de calcul (MPa)	20	50	120	200
Classe de plate-forme	PF1	PF2	PF3	PF4

Tableau XII - Tableau des modules de calcul descriptifs de la plate-forme support de chaussée

3.4.2 Règles de surclassement de portance des plates-formes

L'épaisseur de matériau de couche de forme nécessaire pour permettre un surclassement de portance de la plate-forme support de chaussée, par rapport aux valeurs indiquées dans les tableaux de l'annexe 3, se détermine :

- en examinant l'incidence de l'épaisseur et de la qualité de la couche de forme sur les contraintes et déformations dans les couches de chaussée,
- en vérifiant que les contraintes de traction restent admissibles dans les couches de forme en matériaux traités.

L'effet, sur les contraintes et déformations dans les couches de chaussée, d'un accroissement donné d'épaisseur de la couche de forme dépend des caractéristiques mêmes de la chaussée. Par mesure de simplification, pour couvrir les situations courantes, des règles de surclassement identiques sont proposées ci-après pour les différentes structures de chaussées souples et semi-rigides. On considère successivement le cas des couches de forme en :

- matériaux granulaires non traités,
- sols argileux et limoneux traités en place à la chaux seule, ou chaux+ciment, ou éventuellement ciment seul,
- matériaux traités aux liants hydrauliques,

ces matériaux étant par ailleurs mis en oeuvre selon les modalités préconisées dans les tableaux de l'annexe 3 et introduites par les § 3.2.2. et 3.2.3.

Les épaisseurs indiquées dans les tableaux XIII, XIV et XVI, découlent de calculs de mécanique des chaussées pour l'analyse du comportement de la chaussée en service et de constatations de chantier pour la tenue sous le trafic de chantier des couches de forme.

Pour une technique de chaussée donnée, l'optimisation du dimensionnement de l'ensemble couche de forme - chaussée peut être recherchée par la méthode rationnelle de calcul des chaussées à la condition expresse de disposer de données fiables sur les caractéristiques mécaniques (déformation et résistance) du sol support et du matériau de couche de forme. Les caractéristiques retenues comme représentatives de la situation à long terme devront de plus être validées par des essais effectués sur la plate-forme support de chaussée :

- mesures de module de déformation réversible à partir d'essais de chargement à la plaque ou de mesures au déflectographe,
- module et résistance à la traction mesurés sur carottes, dans le cas de matériaux traités aux liants hydrauliques.

Cette validation nécessitant en général la réalisation d'un chantier expérimental, et des essais en nombre suffisant pour que les résultats puissent être tenus pour représentatifs, cette démarche ne se justifiera que pour les grands chantiers. Dans les autres cas on se rangera à l'application des règles moyennes données ici.

3.4.2.1 Couches de forme en matériau non traité

Les règles de surclassement sont présentées dans le tableau XIII.

Classe de l'arase	Classe de la plate-forme	Matériau de la couche de forme	Epaisseur de Matériau de couche de forme
AR1	PF3	B_{31}, C_1B_{31}, C_2B_{31}, D_{21}, D_{31}, R_{21}, R_{41}, R_{61} C_1B_{11}*, C_2B_{11}*, R_{11}*, R_{42}*, R_{62}*	0,80 m **
AR2	PF3	idem ci-dessus	0,50 m

Tableau XIII - Conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme non traitée.

* sous réserve d'une vérification sur la plate-forme support de chaussée.
** une réduction d'épaisseur de l'ordre de 0,10 à 0,15 m peut être admise si l'on intercale un géotextile adapté entre la couche de forme et la PST.

Les valeurs d'épaisseur de couche de forme permettant un reclassement en PF3 peuvent être validées par des mesures de portance à court terme. Il est donc vivement conseillé de procéder à cette validation, et celle-ci devient impérative lorsque des doutes existent sur les caractéristiques du matériau de couche de forme (cf. (*) du tableau XIII). A l'inverse, avec certains matériaux rocheux, les mesures peuvent conduire à admettre un reclassement en PF4.

3.4.2.2 *Couches de forme en sols argileux et limoneux traités en place*

Les matériaux considérés ici sont :

- pour un emploi avec traitement à la chaux seule : les sols A_3,
- pour un emploi avec traitement mixte (chaux + ciment) ou ciment seul : les sols A_1, A_2 et éventuellement A_3, ainsi que les matériaux C dont la fraction 0/50 mm est constituée par les sols précédents et lorsque la faisabilité du traitement est acquise. La nature du traitement est à choisir en fonction de l'argilosité et de l'état hydrique.

Les règles de surclassement correspondant aux couches de forme réalisées avec ces matériaux sont présentées dans le tableau XIV.

Les autres cas de matériaux traités avec des liants hydrauliques relèvent du paragraphe suivant.

Classe de l'arase	Classe de la plate-forme	Matériau de la couche de forme	Epaisseur de Matériau de couche de forme
AR1 (*)	PF3	A_3 traité à la chaux seule.	0,70 m (en 2 couches)
		A_1, A_2, A_3 traités à la chaux + ciment ou éventuellement ciment seul.	0,50 m (en 2 couches)
AR2	PF3	A_3 traité à la chaux seule.	0,50 m (en 2 couches)
		A_1, A_2, A_3 traités chaux + ciment ou éventuellement ciment seul.	0,35 m

(*) Cas des PST n°2 et 3. Dans le cas d'une PST n°1 (mauvaise portance à la mise en oeuvre) ces solutions de surclassement ne sont pas applicables.

Tableau XIV - Tableau des conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme en sol fin traité en place

3.4.2.3. *Couches de forme en matériaux grenus traités aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux*

Il s'agit principalement des matériaux des classes B, D_1, D_2, des matériaux de classe C dont la fraction 0/50 mm est constituée par les sols précédents lorsque la faisabilité du traitement est acquise, ainsi que certains matériaux rocheux.

Avec ces matériaux et ces liants, il est généralement possible, moyennant des conditions d'exécution et un dosage adaptés, d'atteindre des valeurs de portance élevées et d'obtenir une plate-forme de classe PF3 voire PF4. L'épaisseur de la couche de forme à mettre en oeuvre et le classement de la plate-forme dépendent :

- de la classe de portance du sol support,
- des caractéristiques mécaniques du matériau traité,
- du mode de traitement (en centrale ou en place).

La classe mécanique du matériau de couche de forme se détermine à partir :

- de l'abaque de la figure 6 qui définit des zones selon les valeurs à 90 jours du module d'Young et de la résistance en traction directe mesurés sur des éprouvettes moulées à la compacité prévisible en fond de couche (8cm inférieurs)(1)

- du tableau XV relatif au mode de traitement pour tenir compte de différences dans l'homogénéité du matériau traité.

Traitement en centrale	Traitement en place	Classe mécanique selon le mode de traitement
Zone 1		1
Zone 2	Zone 1	2
Zone 3	Zone 2	3
Zone 4	Zone 3	4
Zone 5	Zone 4, 5	5

Tableau XV - Détermination de la classe mécanique des sables et graves traitées aux liants hydrauliques selon le mode de traitement.

Le tableau XVI propose des valeurs d'épaisseurs pour les différentes classes mécaniques de matériau traité aux liants hydrauliques.

(1) a) La valeur de la compacité en fond de couche prise en considération dans l'étude de formulation doit être validée par des mesures effectuées sur une planche d'essai en début de chantier.
b) Dans le cas où l'on réalise des essais de traction par fendage, la résistance en traction directe R_t sera évaluée à partir de R_{tb} par la relation : $R_t = 0,9\ R_{tb}$

Classe de l'arase		AR1			AR2	
		Epaisseur de matériau de couche de forme				
Classe mécanique du matériau de couche de forme	3	*	30cm	40cm	25cm	30cm
	4	30cm	35cm	45cm**	30cm	35cm
	5	35cm	50cm **	55cm**	35cm	45cm**
Classe de plate-forme obtenue		PF2	PF3	PF4	PF3	PF4

* l'épaisseur minimale de 30 cm permet un reclassement en PF3.
** l'obtention de la compacité recherchée en fond de couche conduira généralement à une mise en oeuvre en 2 couches.

Tableau XVI - Tableau des conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme en matériaux grenus traités aux liants hydrauliques

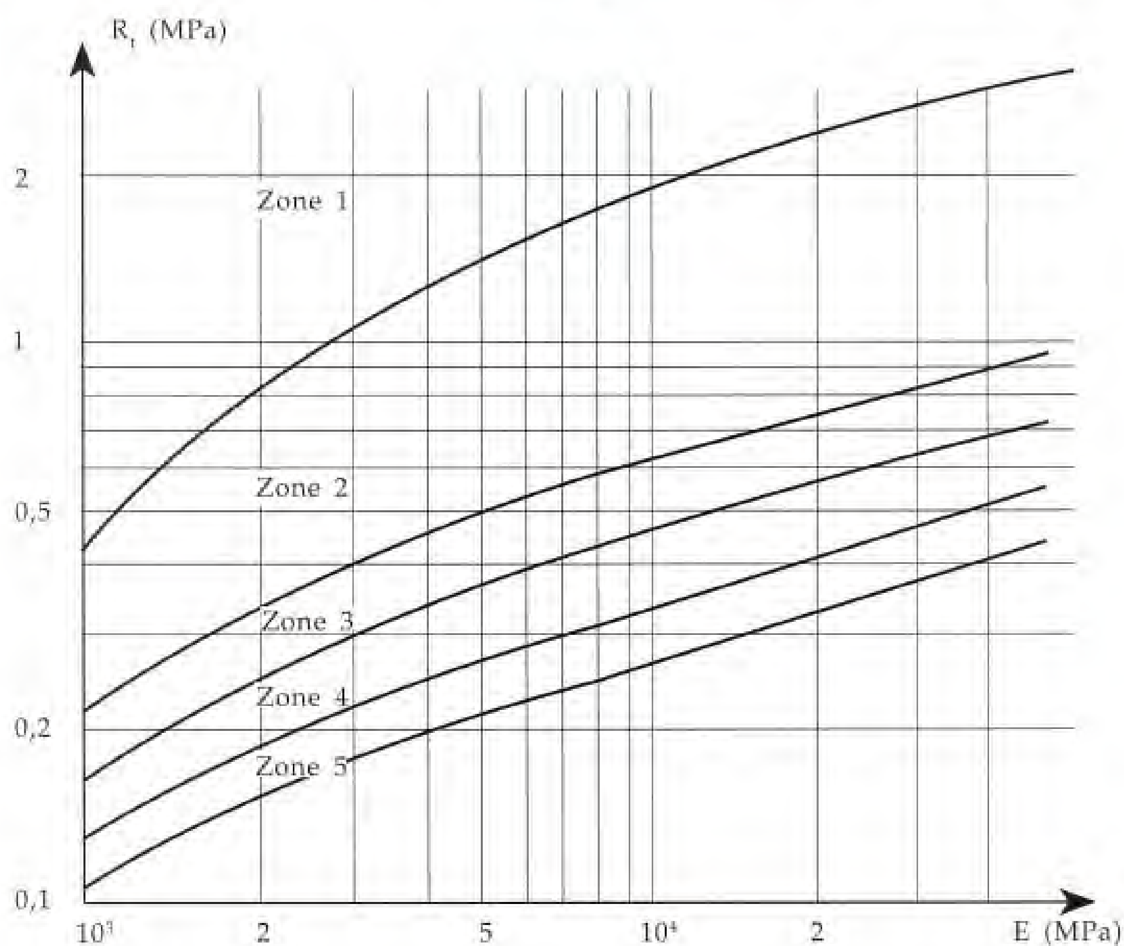


Figure 6 - Classement des matériaux traités selon leurs caractéristiques mécaniques déterminées sur éprouvette à 90 jours.

Chapitre 4

Compactage des remblais et des couches de forme

Les tableaux de compactage de l'annexe 4 et les indications mentionnées ci-après (cf. 4.4) donnent les conditions qui assurent la cohérence entre les facteurs définissant le cas de compactage, à savoir :

- le matériau tel que défini par la classification,
- le matériel de compactage utilisé (type d'engin - paramètres de construction et de fonctionnement, mode d'emploi),
- l'épaisseur compactée,
- l'objectif de compactage.

Cette approche est en accord avec la procédure de contrôle "en continu" des conditions de réalisation du compactage, dont l'intérêt par rapport au contrôle par mesure de la masse volumique n'est plus à démontrer.

4.1 - Prescriptions pour le compactage

Elles sont fixées selon la nature des ouvrages, afin de :

- limiter les tassements des corps de remblai et assurer leur stabilité,
- obtenir des caractéristiques suffisantes de raideur et de résistance pour les couches de forme.

Deux objectifs de densification, désignés symboliquement par q3 et q4 (1) sont définis :

- q3 objectif ordinairement requis pour les couches de forme,
- q4 objectif ordinairement requis pour les remblais.

Les prescriptions données dans les tableaux de compactage correspondent à la définition des modalités d'utilisation des compacteurs pour chaque couple : matériau - matériel.

Ces prescriptions ont été fixées à partir de nombreuses planches expérimentales accompagnées de mesures précises et répétées de la masse volumique en place, de l'observation du comportement d'ouvrages et d'un modèle mathématique calé sur ces données. Ce travail de rationalisation entrepris depuis la recommandation de 1976 a amené à réviser certaines exigences suite en particulier à des constatations répétées d'insuffisances marquées de compactage en fond de couche.

Avec la mise en œuvre par couche et les matériels actuels, on observe en effet une variation de la masse volumique sèche sur la hauteur de la couche compactée, comme l'illustre la figure 7. Pour s'assurer d'un compactage correct, ceci conduit à considérer deux indicateurs :

(1) Les objectifs de densification q1 et q2, non considérés ici, s'appliquent aux assises de chaussées ; q2 correspond généralement à une couche de fondation et q1 à une couche de base. (cf. Guide Pratique pour le Compactage des Assises de Chaussées SETRA - LCPC Décembre 1982).

ρdm : masse volumique sèche moyenne sur toute l'épaisseur de la couche compactée.

ρdfc : masse volumique sèche en fond de couche ; c'est-à-dire la valeur moyenne sur une tranche de 8 cm d'épaisseur située à la partie inférieure de la couche compactée.

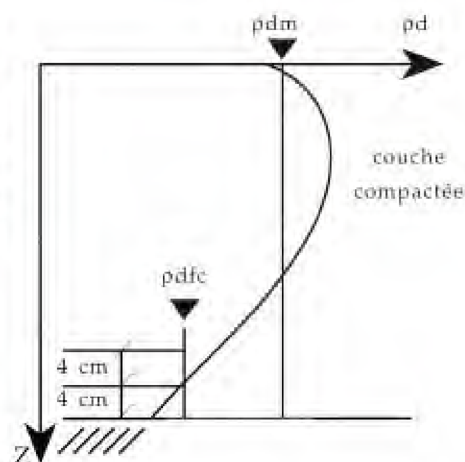


Figure 7 - Variation de la masse volumique sèche sur la hauteur de la couche compactée.

Les prescriptions moyennes des tableaux ont été établies pour atteindre les valeurs moyennes minimales suivantes de ρdm et ρdfc par nature d'ouvrage :

q3 Objectif de densification pour le compactage des couches de forme :

ρdm ≥ 98,5 % ρd OPN et
ρdfc ≥ 96 % ρd OPN

q4 Objectif de densification pour le compactage des remblais :

ρdm ≥ 95 % ρd OPN et
ρdfc ≥ 92 % ρd OPN

Ces valeurs sont à considérer comme des repères mais ne doivent pas être retenues comme prescriptions de compactage (non pertinence de la référence Proctor pour de nombreux matériaux, impossibilité factuelle d'assurer un contrôle véritable et précis de l'ensemble des travaux par mesure de masse volumique, notamment pour ce qui concerne le fond de couche).

On notera que la masse volumique de la partie supérieure de la couche n'est pas directement prise en compte ici pour caractériser la qualité du compactage. Certaines dispositions particulières sont cependant préconisées en fonction du couple matériau-engin pour cette zone.

Lorsque des raisons précises amènent à reconsidérer les prescriptions données dans ce document, il conviendra de procéder à des planches expérimentales pour traduire les prescriptions en modalités d'utilisation des engins de compactage, à l'instar de ce qui est fait dans le présent document. On se reportera au § 4.4.4 pour des commentaires sur les planches d'essais.

4.2 - Données relatives aux matériaux

Les matériaux sont identifiés en familles, classes et sous-classes d'états selon la classification définie par le chapitre 1.

4.3 - Données relatives aux compacteurs

Classement et utilisation

Les définitions et classifications données ci-après font l'objet de normes (P 98-736).

Les compacteurs pris en compte dans ce document ont une largeur de compactage supérieure ou égale à 1,30 m. Les petits compacteurs (rouleaux vibrants - plaques vibrantes - pilonneuses) ont un classement et des conditions d'utilisations qui sont précisées dans un autre document : note technique pour le compactage des remblais de tranchées (SETRA - LCPC). Les classes des plaques vibrantes les plus efficaces sont cependant intégrées dans le présent document, pour le rendre le plus complet possible.

Les différentes familles d'engins considérées ici sont :
- les compacteurs à pneus : Pi
- les compacteurs vibrants à cylindres lisses : Vi
  " " à pieds dameurs : VPi
- les compacteurs statiques à pieds dameurs : SPi
- les plaques vibrantes : PQi

i est le n° de la classe ; il croît avec l'efficacité du compacteur à l'intérieur de chaque famille. Le cas des compacteurs mixtes est précisé au § 4.3.3.

4.3.1 - Les compacteurs à pneus (Pi).

Le classement est fait selon la charge par roue CR :

P1 : CR entre 25 et 40 kN

P2 : CR entre 40 et 60 kN

P3 : CR supérieure à 60 kN

Un compacteur lourd à pneus de la classe P3 (charge par roue > 60KN) particulièrement efficace et polyvalent...



Les compacteurs à pneus sont lestables pour atteindre la charge par roue maximale prévue par le constructeur. Il y a généralement un rapport de l'ordre de 1 à 2 entre le poids à vide et le poids lesté. La recherche de la meilleure efficacité conduit à utiliser la charge par roue maximale compatible avec la "traficabilité".

Un compacteur donné peut être rangé dans différentes classes ; le classement retenu doit se rapporter à la charge par roue effective sur chantier.

La pression de gonflage maximale compatible avec la "traficabilité" est également recommandée, afin d'obtenir la meilleure efficacité.

La vitesse d'utilisation n'a pour limite supérieure que celle résultant de la sécurité de la conduite.

4.3.2 Les compacteurs vibrants à cylindres lisses (Vi)

- **Classement et utilisation**

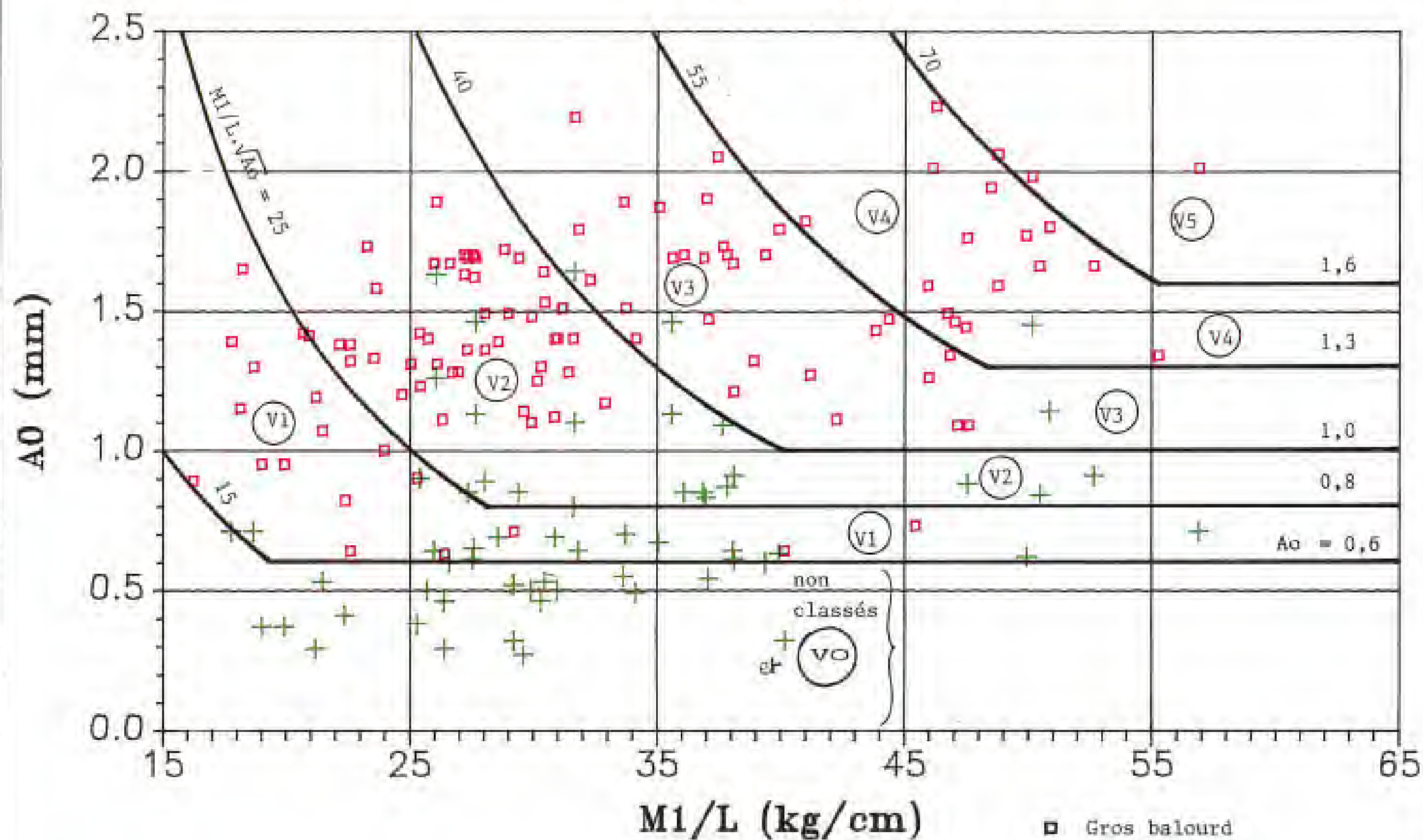
Le classement est effectué à partir du paramètre $(M1/L)\sqrt{A0}$ et d'une valeur minimale pour A0.

M1/L (1) exprimé en kg/cm et A0 (2) en mm conduisent aux cinq classes définies ci-après. Une illustration graphique est donnée par les figures 8 et 9.

V1 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 15 et 25	et $A0 \geq 0{,}6$
	{ supérieur à 25	et A0 entre 0,6 et 0,8
V2 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 25 et 40	et $A0 \geq 0{,}8$
	{ supérieur à 40	et A0 entre 0,8 et 1,0
V3 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 40 et 55	et $A0 \geq 1{,}0$
	{ supérieur à 55	et A0 entre 1,0 et 1,3
V4 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 55 et 70	et $A0 \geq 1{,}3$
	{ supérieur à 70	et A0 entre 1,3 et 1,6
V5 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	supérieur à 70	et $A0 \geq 1{,}6$

(1) M1 : masse totale s'appliquant sur la génératrice d'un cylindre (vibrant ou statique) en kg.
L : longueur de la génératrice du cylindre (vibrant ou statique) en cm.
(2) A0 : est l'amplitude théorique à vide calculable par :
$A0 = 1000 \times (me/M0)$, avec me : moment des excentriques de l'arbre à balourd (mkg) et M0 : masse de la partie vibrante sollicitée par l'arbre à balourd (kg).

CLASSEMENT DES COMPACTEURS VIBRANTS : Monocylindres

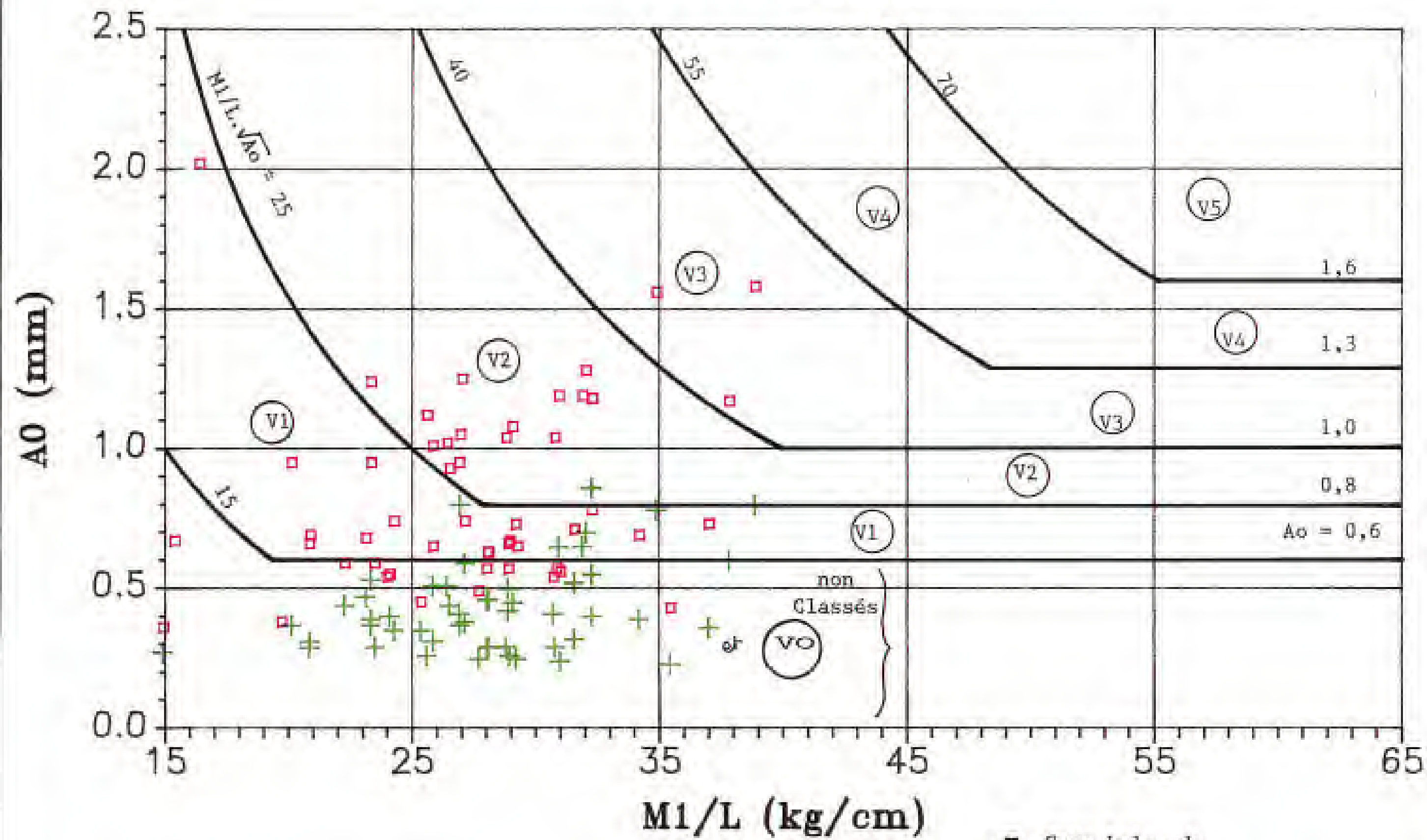


□ Gros balourd

+ Autres balourds

Centre d'Expérimentation Routière

pour les matériels existant au 1.1.92



CLASSEMENT DES COMPACTEURS VIBRANTS :
Tandems
A0 (mm)
M1/L (kg/cm)
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
15
25
35
45
55
65
M1/L.√Ao = 25
40
55
70
15
V1
V2
V3
V4
V5
V4
V3
V2
V1
VO
1,6
1,3
1,0
0,8
Ao = 0,6
non
Classés
Gros balourds
Autres balourds
pour les matériels existant au 1.1.92
Centre d'Expérimentation Routière

A0 peut être contrôlée par la méthode des coussins selon la norme NF P 98-761 "Essai de vérification du moment des excentriques des compacteurs vibrants".



La mesure de l'amplitude à vide A0 peut être réalisée à l'aide d'un vibrographe en faisant vibrer le compacteur sur des coussins pneumatiques (cf norme NFP 98 761).

Les compacteurs vibrants possèdent souvent plusieurs valeurs d'amplitude théorique à vide (variation du moment des excentriques) et/ ou plus rarement peuvent être lestés. Un matériel donné peut donc, éventuellement, être placé dans différentes classes selon la valeur de A0 et /ou de M1/L.

Les compacteurs vibrants sont considérés comme fonctionnant à la fréquence maximale prescrite par le constructeur pour le balourd considéré.

A l'exception des classes V1 et V2, une fourchette de vitesses de translation est admise, qui influe sur les modalités de compactage (annexe 4.1.2). Cependant, la faculté d'employer une vitesse élevée, intéressante pour les débits, n'est autorisée que si le compacteur possède un compteur de vitesse au tableau de bord et un dispositif enregistreur pour la contrôler.

• **Monocylindres et tandems**

Les deux morphologies les plus répandues sont les monocylindres désignés par VMi et les tandems par VTi. (Vi = classe d'efficacité définie précédemment).



Un compacteur vibrant mono-cylindre lisse de la classe VM4.

- Sont regroupés sous le type VMi tous les monocylindres vibrants, les tandems transversaux (cylindres disposés selon un seul essieu) ainsi que les tandems longitudinaux à un seul cylindre vibrant. Les tableaux (e, Q/S) leur sont directement applicables.
- Sont répertoriés VTi les tandems longitudinaux avec vibration sur chaque cylindre.

Dans la plupart des cas, la classe d'efficacité est la même entre cylindre AV et cylindre AR. Par rapport aux monocylindres, la valeur de Q/S et le nombre d'applications de charge à prendre en compte sont les mêmes. Le nombre de passes, lui, en est la moitié (cf. annexe 4.1.1).



Un compacteur vibrant tandem-transversal de la classe V5 : une morphologie originale permettant une excellente maniabilité et une mobilisation optimale des masses pour le compactage.

Dans les cas exceptionnels où les paramètres de masse et de vibration sont différents entre les cylindres AV et AR, deux cas sont possibles :

a) les valeurs de $(M1/L)x\sqrt{A0}$ diffèrent de moins de 10 % : la classe d'efficacité unique est déterminée à partir de la valeur moyenne des $(M1/L)\sqrt{A0}$ et on revient au cas précédent.

b) les valeurs de $(M1/L)x\sqrt{A0}$ diffèrent de plus de 10 % : un tel compacteur tandem différencié est considéré comme la somme de deux monocylindres placés dans leur classe respective ; les modalités d'utilisation sont précisées en annexe 4.1.2.

4.3.3 - Les compacteurs mixtes



Un compacteur mixte pouvant être considéré comme la somme d'un compacteur vibrant monocylindre de la classe V3 et d'un rouleau à pneus de la classe P1.

Ils sont constitués d'un cylindre vibrant et d'un train de pneus dont le nombre peut être considéré comme suffisant pour contribuer au compactage en recouvrant l'ensemble de la largeur de génératrice du cylindre (intervalle entre surfaces de contact ≤ largeur d'un pneu).

On les considère comme la somme d'un compacteur vibrant monocylindre VMi et d'un compacteur à pneus Pj. Les modalités d'utilisation sont précisées en annexe 4.1.2. Ces compacteurs sont désignés VXi - Pj par la norme NF P98-736

4.3.4. Les compacteurs vibrants à pieds dameurs (VPi).

Un compacteur vibrant à pieds dameurs de la classe VP1.



Ce sont généralement des versions dérivées des compacteurs vibrants à cylindres lisses évoqués au § 4.3.2. Leur classement reprend les mêmes critères :

VP1 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 15 et 25	et A0 ≥ 0,6
	{ supérieur à 25	et A0 entre 0,6 et 0,8
VP2 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 25 et 40	et A0 ≥ 0,8
	{ supérieur à 40	et A0 entre 0,8 et 1,0
VP3 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 40 et 55	et A0 ≥ 1,0
	{ supérieur à 55	et A0 entre 1,0 et 1,3
VP4 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 55 et 70	et A0 ≥ 1,3
	{ supérieur à 70	et A0 entre 1,3 et 1,6
VP5 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	supérieur à 70	et A0 ≥ 1,6

Dans le cas où la version à pieds dameurs est proposée en option, son classement peut différer de celui du compacteur vibrant à cylindre lisse auquel il s'apparente, du fait de différences de masse et d'amplitude.

Les modalités de compactage ne diffèrent de celles des vibrants lisses qu'à partir de la classe VP3. Elles sont établies en recherchant le bénéfice tiré à la fois de la vibration et des pieds dameurs. Par rapport aux vibrants lisses de même classe, ceci s'obtient à la vitesse la plus élevée et par conséquent pour une épaisseur plus faible ; la valeur de Q/S est augmentée. Les compacteurs vibrants à pieds considérés dans les tableaux de compactage, sont des monocylindres désignés VPMi dans la norme NFP 98-736.

4.3.5 Les compacteurs statiques à pieds dameurs (SPi)

Le classement est fait selon la charge statique moyenne par unité de largeur du ou des cylindres à pieds (M1/L).

SP1 : M1/L entre 30 et 60 kg/cm
SP2 : M1/L supérieur à 60 kg/cm et inférieur à 90 kg/cm

Pour les compacteurs avec lestage possible, le classement est celui correspondant à la situation rencontrée sur chantier.



Un compacteur statique à pieds dameurs de la classe SP1. Lorsque l'engin est utilisé en régalage comme ci-contre, il n'est pas considéré en tant que compacteur.

La vitesse maximale possible est à utiliser : en particulier, la fin du compactage doit pouvoir être effectuée à une vitesse de 10 à 12 km/h. Les premières passes ont généralement une vitesse nettement plus réduite, sans devenir inférieure à 2 à 3 km/h.

Pour les compacteurs équipés d'une lame, la part de temps consacrée au poussage et au régalage des sols n'est pas prise en compte dans le compactage.

Au cas où la vitesse moyenne observée sur chantier (qui ne devrait pas être en dessous de 6 km/h) est inférieure à la vitesse moyenne lue dans les tableaux de compactage, il convient d'en tenir compte pour réévaluer le débit.

Les compacteurs tandems (cas fréquents) ont le même Q/S et le même nombre d'applications de charge que les monocylindres (valeurs des tableaux). Le nombre de passes est à diviser par deux.

4.3.6 - Les plaques vibrantes (PQi)

L'ensemble des plaques est classé PQ1 à PQ4 dans la Note Technique pour le compactage

des remblais de tranchées (SETRA-LCPC).

Elles sont classées à partir de la pression statique sous la semelle Mg/S exprimée en kPa (Mg représente le poids de la plaque).

Les plus petites plaques (PQ1 - PQ2) ne sont pas prises en compte. Celles considérées ici sont :

PQ3 : Mg/S entre 10 et 15 kPa
PQ4 : Mg/S supérieur à 15 kPa

S est la surface de contact plaque/sol et non la surface hors tout. Pour les modèles équipés d'élargisseurs, S varie et il convient d'en tenir compte pour la classification qui peut alors changer.

4.4 - Règles de compactage

4.4.1 - Les tableaux de compactage

Les tableaux de compactage (cf. annexe 4) sont établis pour un matériau "moyen" à l'intérieur de la classe et la sous-classe correspondantes. Par contre, ils correspondent à l'emploi d'un compacteur situé à **la frontière basse** de la classe d'efficacité considérée.

Les C.A.T.M. (Certificats d'Aptitude Technique des Matériels) prennent en compte les paramètres propres d'un compacteur donné. Les modalités d'utilisation fournies sont alors les valeurs exactes relatives à ce matériel.

Une case non renseignée dans les tableaux signifie que le compacteur considéré ne permet pas d'atteindre les objectifs définis en 4-1 pour une couche de plus de 0,20 m.

Une valeur "plancher" de 0,30 m, plus réaliste, est adoptée pour l'optimisation des débits dans le cas des vibrants (annexe 4.1.2).

Dans le cas particulier des compacteurs à pieds dameurs, l'absence totale d'indications, quelle que soit la classe d'efficacité, correspond à l'inaptitude de ce type de matériel pour le sol considéré (faible cohésion).

Les réserves concernant la traficabilité n'ont qu'un caractère indicatif. En effet, les limites de traficabilité sont dépendantes, à l'intérieur d'une même classe d'efficacité, de la conception des matériels (ex. : cylindre vibrant moteur ou non).

La fermeture de la partie supérieure des couches (pieds dameurs, vibrants lourds) peut faire appel à un complément de compactage ou à une opération spécifique indiquée en note.

Dans les tableaux, les valeurs Q/S et e (associées à l'utilisation d'une vitesse de translation donnée) se prêtent à la définition des clauses contractuelles.

Les tableaux comportent, à titre indicatif, les valeurs d'autres paramètres utiles à la définition de l'atelier de compactage, au calcul des rendements...

La définition de ces paramètres auxiliaires :

N : nombre d'applications de charge (1),
Q/L: débit horaire par unité de largeur du compacteur,

est donnée en annexe 4.1.1, avec des exemples d'application.

4.4.2 - Les paramètres définissant les modalités de compactage

- **Le paramètre Q/S**

Le nombre indiqué dans la partie supérieure de chaque case des tableaux représente une valeur du rapport Q/S, exprimé en m3/m2, dans lequel Q est le volume de sol compacté pendant un temps donné (par exemple un jour, ou une heure), et S la surface balayée par le compacteur pendant le même temps.

- Q représente le rythme de production de l'atelier de terrassement.

Sur le chantier il peut être soit déterminé par des métrés après compactage, soit évalué à partir du nombre, de la charge moyenne, des coefficients de foisonnement et contrefoisonnement, et de la durée du cycle constatée pour les engins de transport.

Au stade de l'étude, Q est estimé en tenant compte des données du projet et des contraintes d'exécution.

- S représente le rythme d'utilisation d'un compacteur.

S est le produit, pendant le temps choisi pour l'évaluation de Q, de la distance D parcourue "en compactage", par la largeur de compactage L. Il est pondéré par le facteur morphologique du compacteur (cf. annexe 4.1.1).

La distance D peut être déterminée sur chantier au moyen d'un compteur kilométrique monté sur le compacteur.

Les longueurs élémentaires parcourues par le compacteur avec des paramètres de fonctionnement non conformes (par ex. : vibration arrêtée pour un Vi, vitesse de translation trop élevée, etc.) ne sont pas à prendre en compte dans l'évaluation de D.

(1) le nombre d'applications de chage N correspond au nombre de passes dans le cas des rouleaux à pneus et des rouleaux monobilles, et au double du nombre de passes dans le cas des rouleaux tandems.

INTERPRETATION

D'un point de vue pratique, la valeur du paramètre Q/S représente l'épaisseur d'un matériau donné que peut compacter un compacteur donné en une application de charge pour obtenir la compacité recherchée ; à ce titre, elle pourrait être dénommée :"épaisseur unitaire de compactage".

En d'autre termes, il est immédiatement possible en examinant dans les tableaux de l'annexe 4 les valeurs de Q/S correspondant à une classe de matériau et à une intensité de compactage données, de comparer l'efficience des différentes classes de compacteurs et donc de comparer plusieurs engins dès lors que leur classement est connu.

Enfin il découle de cette présentation de la valeur du paramètre Q/S que le nombre de passes théorique moyen qui doit être appliqué sur une couche de matériau d'épaisseur donnée, s'obtient directement par le rapport entre l'épaisseur de la couche et la valeur du Q/S correspondant à la classe du compacteur et à celle du matériau considérées.

Dans les tableaux de compactage de l'annexe 4, on observe que les valeurs de Q/S diminuent lorsque l'intensité de compactage exigée est plus grande; cela est cohérent avec l'interprétation précédemment donnée du paramètre Q/S.

Lorsque les valeurs de Q/S sont utilisées en tant que spécifications, elles doivent être interprétées de la manière suivante :

- dans le cas d'énergies de compactage intense (code 1) et moyenne (code 2), la valeur de Q/S indiquée est une valeur maximale : le Q/S réel doit être inférieur ou égal au Q/S indiqué dans le tableau. Surtout dans le cas de compactage intense, il n'y a pas d'inconvénient à ce qu'il soit très inférieur. Les cas d'insuffisances de compactage se rencontrent en effet plus fréquemment là où la difficulté de compactage requiert une énergie intense (sols secs en particulier),
- dans le cas d'énergie de compactage faible (code 3), le Q/S réel doit être proche du Q/S indiqué dans les tableaux ; la valeur moyenne doit évidemment être centrée sur la valeur indiquée. Elle ne doit être ni beaucoup plus élevée, ni beaucoup plus faible ; l'intervalle normalement acceptable à l'échelle de l'heure de travail est d'environ ± 20 % par rapport à la valeur indiquée. Sur les sols humides pour lesquels le compactage s'accompagne d'un phénomène de matelassage, il n'est pas bénéfique d'employer une énergie de compactage plus forte que celle prévue ; elle conduirait à diminuer encore davantage la portance,
- la même valeur de Q/S du cas considéré est à prendre en compte quelle que soit la valeur réelle de l'épaisseur qui doit rester dans la limite de la valeur maximale indiquée.

• **L'épaisseur compactée**

La valeur d'épaisseur compactée indiquée est une valeur maximale : l'épaisseur réelle doit lui être inférieure ou égale. Les valeurs d'épaisseurs maximales de couches ne sont fixées que par rapport à la seule opération de compactage ; elles ne tiennent pas

compte en particulier des contraintes pouvant être imposées le cas échéant sur le régalage (couches minces pour parfaire la fragmentation ou l'aération du matériau...).

• **La vitesse de translation**

Les prescriptions relatives à la vitesse de translation sont à examiner différemment selon la famille de compacteur :

- Pour les compacteurs vibrants V3 à V5, les tableaux donnent deux cas de vitesse de translation permettant d'optimiser le débit de l'atelier de compactage, en fonction des conditions réelles du chantier. La prise en compte de l'influence de la vitesse des compacteurs vibrants sur leur efficacité en profondeur a conduit à cette présentation.
- La ou les valeurs de vitesse indiquées sont des valeurs maximales (à ± 10 %).
- Pour les compacteurs à pneus et les compacteurs statiques à pieds dameurs, la valeur indiquée correspond à la vitesse moyenne estimée durant l'ensemble des passes effectuées sur la zone de compactage. En effet, pour ces matériels et compte tenu de l'aspect "traficabilité", les vitesses en début de compactage sont généralement plus faibles qu'en fin de compactage.
- Pour les plaques vibrantes, il s'agit d'une vitesse moyenne généralement constatée.

4.4.3 - Exemple de tableau des modalités de compactage

Le tableau XVII ci-contre, extrait de l'annexe 4, reproduit les modalités de compactage à appliquer pour l'utilisation des sols A_1 - C_1A_1 en remblai. On remarque en particulier que pour les compacteurs V3, V4, V5, il existe deux vitesses de translation possibles auxquelles correspondent des modalités de compactage différentes.

Tableau XVII - Tableau de compactage pour l'utilisation des matériaux A_1-C_1A_1 en remblai

A_1, C_1A_1 (*)

Modalités \ Compacteur		P1	P2	P3	V1	V2	V3		V4		V5		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	SP1	SP2	PQ3	PQ4
Energie de compactage faible	Q/S	0.080	0.120	0.180	0.055	0.085	0.125		0.165		0.205		0.055	0.085	0.165	0.205	0.265	0.070	0.100		0.065
	e	0.30	0.45	0.60	0.25	0.35	0.30	0.50	0.35	0.65	0.40	0.80	0.25	0.30	0.30	0.35	0.40	0.25	0.40		0.20
			(1)	(1)					(1)	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	0	(1)
	V	5.0	5.0	5.0	2.0	2.5	4.0	2.5	5.0	2.5	5.0	2.5	2.0	3.0	4.0	5.0	5.0	8.0	8.0		1.0
Code 3	N	4	4	4	5	5	3	4	3	4	2	4	5	4	2	2	2	4	4		3
	Q/L	400	600	900	110	215	500	315	825	415	1025	515	110	255	660	1025	1325	560	800		65
Energie de compactage moyenne	Q/S	0.046	0.065	0.095		0.040	0.065		0.085		0.100			0.040	0.085	0.100	0.130	0.040	0.070		
	e	0.25	0.35	0.45		0.25	0.30	0.40	0.30	0.50	0.30	0.60		0.25	0.30	0.30	0.30	0.20	0.30		
					0								0	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	0	0
	V	5.0	5.0	5.0		2.0	2.5	2.0	3.5	2.0	4.0	2.0		2.0	2.5	3.5	4.0	8.0	8.0		
Code 2	N	6	6	5		7	5	7	4	6	3	6		7	4	3	3	5	5		
	Q/L	225	325	475		80	165	130	300	170	400	200		80	215	350	520	320	560		
Energie de compactage intense	Q/S		0.035	0.050		0.025	0.040		0.050		0.065			0.025	0.050	0.065	0.085		0.035		
	e		0.20	0.30		0.20		0.30	0.30	0.40	0.30	0.45		0.20	0.30	0.30	0.30		0.25		
		0			0								0					0		0	0
	V		5.0	5.0		2.0		2.0	2.5	2.0	3.0	2.0		2.0	2.0	2.5	3.0		8.0		
Code 1	N		6	6		8		8	6	8	5	7		8	6	5	4		8		
	Q/L		175	250		50		80	125	100	195	130		50	100	165	255		280		

Q/S	(m)
e	(m)
V	(km/h)
N	-
Q/L	(m^3/h m)
0	compacteur ne convenant pas

(*) Impose que Dmax < 2/3 de l'épaisseur de la couche compactée

(1) S'assurer de la traficabilité du compacteur

(2) Prévoir une opération annexe pour effacer les empreintes lorsqu'il y a risque de pluie en fin de journée (rabotage des centimètres supérieurs, ou emploi d'un autre type de compacteur si celui-ci apporte l'effet souhaité)

4.4.4 - Condition à satisfaire pour un bon compactage

Outre le respect des valeurs de Q/S et des épaisseurs maximales des couches, il importe de s'assurer :

- d'une bonne organisation du chantier notamment pour garantir l'homogénéité du matériau approvisionné, la répartition de l'effort de compactage (plan de balayage et cadence d'approvisionnement) et le délai de compactage dans le cas de sol traité au ciment par exemple.

L'attention est attirée sur la nécessité de donner aux conducteurs d'engins des consignes précises et adaptées aux objectifs de qualité. Dans certains cas (zones exiguës par exemple) ces consignes peuvent conduire à diminuer le Q/S donné par les tableaux.

- du fonctionnement correct des compacteurs. Les paramètres essentiels sont :

  . pour les compacteurs vibrants : V, me, f.
  . pour les compacteurs à pneus : V, lest (ou charge effective par roue), pression de gonflage des pneumatiques.

Il appartient au contrôle de qualité de bien vérifier la concordance entre les conditions de fonctionnement et la détermination de la classe du compacteur. Les fiches techniques ou certificats d'aptitude technique peuvent être très utiles à cet égard.

En général, il n'y a pas lieu de faire varier trop souvent les valeurs de ces paramètres pour un cas de chantier donné (pour les compacteurs à pneus et à pieds dameurs, la vitesse qui peut être faible aux premières passes, doit augmenter ensuite). On évitera également l'emploi d'ateliers hétérogènes qui pénalisent les matériels les plus performants ou compliquent l'organisation du chantier.

Pour le compactage dans les sites d'accès difficile, les conditions de compactage peuvent être choisies à partir de la note technique pour le compactage des remblais de tranchées, en complément du présent document.

4.4.5 - Recours à des planches d'essais

Celui-ci doit rester exceptionnel et concerner principalement les cas suivants :

- sols relativement secs. Il convient de consulter au préalable le guide édité par l'ISTED sur le compactage à faible teneur en eau (1987),
- matériaux très difficiles à compacter (angularité très élevée, granulométrie discontinue...),
- traitements particuliers,
- sols évolutifs dont le comportement reste mal apprécié,
- sous-produits industriels,
- engins insuffisamment connus, etc.

Lorsqu'elles sont envisagées, les planches d'essais doivent faire l'objet d'un véritable plan d'expériences identifiant parfaitement l'objectif visé et définissant les modalités étudiées en terme de sol (nature, état), épaisseur, matériel (classe et paramètres de fonctionnement), plan de balayage, critères de qualité et moyens de mesures utilisés.

Si cela est possible, la définition du plan d'expériences s'appuiera sur les renseignements des tableaux de compactage relatifs aux cas estimés voisins de celui à examiner.

Bibliographie

DOCUMENTS GENERAUX

- Cahier des Clauses Techniques Générales
Fascicule n° 2 : Terrassements généraux - Circulaire n° 79-27 du 14 mars 1979. Bulletin Officiel du Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie et du Ministère des Transports.

- Documents types pour appels d'offres et marchés - Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes SETRA (décembre 1981).

- Le compactage - G. ARQUIE et G. MOREL
Editions Eyrolles, 1989 - Paris.

- Terrassements, Drainage, Couche de forme - Association internationale permanente des Congrès de la Route (AIPCR) :
    - 18e Congrès mondial de la route (Classification des matériaux évolutifs - Standardisation du concept de couche de forme) - 1987
    - 19e Congrès mondial de la route (Le traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques - Erosion des sols pendant et après la construction des routes) - 1991
- Mémento - Méthode de terrassements routiers utilisée en France - SETRA - LCPC- 1987.

NORMES AFNOR

- NFP 11300	Exécution des Terrassements Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
- P 18-101 (1990)	Granulats - Vocabulaire - Définitions et classifications
- P 18-572 (1990)	Granulats - Essai d'usure micro-Deval
- P 18-573 (1990)	Granulats - Essai Los Angeles
- P 18-574 (1990)	Granulats - Essai de fragmentation dynamique
- P 18-576 (1990)	Granulats - Mesure du coefficient de friabilité des sables
- P 18-593 (1990)	Granulats - Sensibilité au gel
- NFP 94-050 (1991)	Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des sols - Méthode par étuvage
- P 94-051	Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau
- NFP 94-055 (1991)	Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matière organique
- P 94-056	Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la granulométrie des sols par tamisage
- P 94-057	Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la granulométrie des sols fins par sédimentation
- P 94-064	Sols : reconnaissance et essais - Masse volumique d'un échantillon de roche déshydraté
- P 94-066	Sols : reconnaissance et essais - Mesure du coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux

- P 94-067	Sols : reconnaissance et essais - Mesure du coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux
- P 94-068	Sols : reconnaissance et essais - Valeur au bleu de méthylène d'un sol - Méthode à la tache
- P 94-078	Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat - Indice portant immédiat
- P 94-093	Sols : reconnaissance et essais - Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol par l'essai Proctor normal et Proctor modifié
- NFP 98-705 (1992)	Matériels de construction et d'entretien des routes : Compacteurs - Terminologie et spécifications commerciales
- P98-713	Qualification du matériel routier. Méthodes d'essai des performances des matériels de compactage
- NFP 98-736 (1992)	Matériels de construction et d'entretien des routes : classification des compacteurs
- NFP 98-760 (1992)	Matériels de construction et d'entretien des routes : Compacteurs à pneumatiques. Evaluation de la pression de contact au sol
- NFP 98-761 (1992)	Matériels de construction et d'entretien des routes : Compacteurs - Evaluation du moment d'excentrique
- P 98-234.2	Essai de gonflement au gel d'un matériau 0/20.

DOCUMENTS D'APPLICATION

- Note d'information technique - Reconnaissance géologique et géotechnique des tracés de routes et autoroutes - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC (1982)
- Recommandation pour les terrassements routiers - Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes et Laboratoire Central des Ponts et Chaussées SETRA-LCPC.

  Fascicule 4 : Contrôle de l'exécution des remblais et des couches de forme (1981)
- Recommandation «Météorologie et Terrassements» SETRA-LCPC (juin 1986)
- Guide technique «Le déroctage à l'explosif dans les travaux routiers» SETRA-LCPC (1988)
- Guide technique «Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques» (document SETRA-LCPC en préparation)
- Note d'information n° 59 «Traitement des sols à la chaux et (ou) aux ciments». SETRA. Juillet 1990. (aspects technique et économique)
- Note d'information technique. Notions générales sur les géotextiles en géotechnique routière. Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes et Laboratoire Central des Ponts et Chaussées SETRA-LCPC (1983)
- Recommandations pour l'emploi des géotextiles. Comité Français des Géotextiles et Géomembranes CFGG :

  Fascicule : Recommandations générales pour la réception et la mise en œuvre des géotextiles. Normes françaises d'essai (1984)

  Fascicule : Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans les voies de circulation provisoire, les voies à faible trafic et les couches de forme (1981)

Fascicule : Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans les aires de stockage et de stationnement (1981)

Fascicule : Recommandations pour l'emploi des géotextiles sous remblais sur sols compressibles (1985)

Fascicule : Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans les systèmes de drainage et de filtration (1986)

- Catalogue des structures-types de chaussées neuves. Direction des Routes et de la Circulation Routière (1977 - 1988).
- Guide technique : Dimensionnement des structures de chaussées (en préparation)

ARTICLES TECHNIQUES

* Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées

Bull. n° 111
Janv.-févr.
1981

- Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassement routier
  Tran Ngoc Lan

Bull. n° 120
Juil.-août
1982

Présentation : E. Leflaive

- Chaîne mécanisée d'identification rapide des sols
  M. Kergoet
- La double sonde gamma et le dispositif de forage associé
  J.-C. Valeux
- Essai granulaire rapide pour sols peu argileux et granulats
  Tran Ngoc Lan, R. Barbaras

Bull. n° 121
Sept.-oct.
1982

- Application de la Recommandation pour les terrassements routiers sur des chantiers de faible importance. Constatations
  J. Puig, G. Véron
- Contrôle de l'exécution des remblais et des couches de forme. Présentation du quatrième fascicule de la Recommandation pour les terrassements routiers
  M. Schaeffner
- Synthèse d'une enquête sur les contrôlographes
  J.P. Berthier

Bull. n° 122
Nov.-déc.
1982

- La dynaplaque
  J. Benoist, M. Schaeffner
- Bilan du contrôle en continu (Q/S-e) des terrassements routiers en Normandie
  A. Fèvre, J.J. Corbin, G. Vigéa
- Imperméabilisation des plates-formes de terrassement
  D. Puiatti, A. Quibel

Bull. n° 123
Janv.-févr.
1983

- Classification des craies et conditions de réutilisation en remblai
  M. Rat, M. Schaeffner
- Validité de la prévision météorologique pour la conduite de chantier
  A. Quibel
- Choix des sources de renseignements météorologiques. Bilan hydrique. Arrêts de chantier
  M. Segouin

Bull. n° 124
Mars-avril
1983

- Comportement des sols supports de chaussées à l'appareil triaxial à chargements répétés - J.L. Paute
- Dimensionnement des couches de forme non traitées - R. Bickard, R. Zwingelstein

* Le contrôle du compactage des remblais au moyen du Pénétrodensitographe PDG 1000. Rapport des Laboratoires des Ponts et Chaussées GT 35 (1989).

* Le savoir-faire français en matière de compactage à faible teneur en eau des sols et matériaux de terrassements et chaussées. ISTED 1987